

# Tuhkan hydratointi voimalaitoksella

Jussi Arvaja

Opinnäytetyö

Toukokuu 2016

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Arvaja, Jussi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2016
	Sivumäärä 54	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Tuhkan hydratointi voimalaitoksella</b>		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Jorma Matilainen		
Toimeksiantaja(t) UPM-Kymmene Oyj, Jokilaakson tehtaat		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja on UPM-Kymmene Oyj:n Jokilaakson tehtaat. Työn suunnittelu- ja mitoitussuuden kohteena oli Kaipolan voimalaitos, jossa syntyy lentotuhkaa leijupetikattilan polttoprosessin seurauksena. Käsittelemätön ja kuiva lentotuhka pölyää hyvin voimakkaasti ja kasteltu tuhka taas kerääntyy rakenteisiin. Työn taustalla oli tarve kehittää lentotuhkan käsittelyä toimivammaksi ja mahdollistaa lentotuhalle parempia hyödyntämismahdollisuuksia.</p> <p>Hydratointia on aikaisemmin tutkittu kemiallisen reaktion osalta. Työn tarkoituksena oli tutkia hydratoinnin toteuttamismahdollisuuksia teollisessa mittakaavassa ja selvittää prosessin edelleen kehittämistä lannoitetuotteen valmistukseen.</p> <p>Työ toteutettiin tutkimalla lentotuhkan jätetilastoja mitoituksen perustaksi. Lisäksi tehtiin sekä laboratorio- että luonnollisen mittakaavaan testejä hydratoinnin toteutuksen vaatimusten selvittämiseksi. Analysoimalla testituloksia pystyttiin määrittämään tarvittavan laitteiston vaatimukset hydratoinnin toteuttamiseksi kiinteänä prosessina voimalaitoksella.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin selville, että voimalaitoksella on mahdollista toteuttaa tuhkan hydratointia kohtuullisin kustannuksin. Työssä saatiin myös määritettyä vaatimukset tarvittavalle laitteistolle ja perusteet prosessin suorittamiselle. Työssä lisäksi määritettiin asiat, joita tulee mitata prosessin ohjaamiseksi.</p> <p>Opinnäytetyö antaa perustan hydratointilaitteiston suunnittelulle sekä alustavat tiedot hydratointilaitteiston tarkempien kustannusten arviointiin.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Hydratointi, hydraatio, lentotuhka, voimalaitos		
Muut tiedot		

Author(s) Arvaja, Jussi	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2016
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 54	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Ash hydration at power plant</b>		
Degree programme Degree Programme in Mechanical and Production Engineering		
Supervisor(s) Matilainen, Jorma		
Assigned by UPM-Kymmene Oyj, Jokilaakso mills		
<p>Abstract</p> <p>The assignor of the bachelor's thesis was UPM-Kymmene Jokilaakso mills. The planning and design of this assignment focused on Kaipola power plant where fly ash is formed as a result of the combustion process in the fluidized bed boiler. Unprocessed and dry fly ash forms plenty of dust, and watered ash accumulates in the structures. The need to develop the processing of fly ash and to enable better utilization of fly ash gave reason for this assignment.</p> <p>Hydration has previously been investigated in as a chemical reaction. The aim of the assignment was to study the feasibility of hydration on an industrial scale and to determine further development of the process for manufacturing fertilizer products.</p> <p>The task was executed by studying the fly ash waste statistics to form the foundation for dimensioning. In addition, both laboratory tests and tests on the natural scale were finished to find out the requirements for implementing hydration. By analyzing the test results, it was possible to determine the hardware requirements to implement a fixed hydration process at the power plant.</p> <p>The study showed that it is possible to carry out hydration of ash at reasonable costs at the power plant. Also, the requirements for the necessary hardware and the criteria for carrying out the process were defined. Moreover, the variables that need to be measured to be able to control the process were defined.</p> <p>The thesis provides the foundation for planning hydration equipment and preliminary information for assessing the detailed costs of the hydration equipment.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) Hydration, fly ash, power plant		
Miscellaneous		

## Sisältö

1	Opinnäytetyön lähtökohdat.....	4
1.1	Opinnäytetyön tavoitteet.....	4
1.2	UPM-Kymmene Oyj.....	5
2	Leijupoltto.....	6
3	Tuhkan hyötykäyttö.....	7
3.1	Tuhkan koostumus.....	8
3.2	Lentotuhkan lannoiteominaisuudet .....	9
4	Lentotuhkan jalostusmenetelmät.....	9
5	Hydratoitu tuhka .....	11
5.1	Tuhkan hydratoinnin periaate .....	11
5.2	Hydratointi kemiallisena reaktiona.....	12
5.3	Hydratoinnin edut.....	13
6	Tutkimusosuus .....	14
6.1	Lentotuhkan tiheys .....	14
6.2	Hydratointikokeet.....	16
6.2.1	Kuuman tuhkan vaikutus lisätyn veden haihtumiseen .....	16
6.2.2	Haihtumiskoe .....	17
6.2.3	Sumutuskokeet .....	19
6.2.4	Prototyyppi .....	22
6.3	Kuormaustesti.....	25
7	Hydratoinnissa vaadittavat laitteet ja rakenteet .....	26
7.1	Kuljettimet.....	26
7.2	Kuljettimien mitoitus .....	28
7.3	Tuhkan kostutuksen toteuttaminen .....	28
7.3.1	Mitoitus.....	28
7.3.2	Tuhkan määrän mittaaminen .....	29
7.3.3	Veden määrän mittaaminen .....	30

7.3.4	Kosteuden mittaus .....	30
7.3.5	Veden lisääminen tuhkaan .....	31
7.4	Hydratointitila .....	33
7.4.1	Tilan koko .....	33
7.4.2	Rakennustekniset vaatimukset .....	35
7.5	Valmiin tuhkan purkaminen hydratointitilasta .....	37
7.6	Lisäaineiden sekoittaminen tuhkan sekaan .....	38
7.7	Lietteen avulla hydratointi .....	40
7.8	Prosessin ohjaaminen .....	40
7.9	Lentotuhkasiilo .....	41
7.10	Reaktion vapauttaman lämmön hyödyntäminen.....	42
8	Kustannukset.....	43
9	Ongelmatilanteet hydratoinnin kannalta .....	44
10	Johtopäätökset ja pohdinta .....	45
	Lähteet.....	48
	Liitteet .....	51
	Liite 1. Jyväskylän yliopistossa tehtyjen tuhka ja liete -hydratointikokeiden tuloksia. ....	51
	Liite 2. Tuhkan liukenevuusanalyysit.....	52
	Liite 3. Layout esimerkki hydratoinnin toteutuksesta.....	53
	Liite 4. Laskelma hydratoinnissa muodostuvasta lämpöenergiasta .....	54

## Kuviot

Kuvio 1. Polttoaineiden käyttöjakauma, Kaipolan voimalaitos 2012. ....	6
Kuvio 2. Leijupetikattilan poikkileikkaus .....	7
Kuvio 3. Mikroskooppikuva käsittelemättömästä ja hydratoidusta lentotuhkasta. ...	13
Kuvio 4. Lämpötilan vaikutus lisätyn veden haihtumiseen tuhkan hydratoinnissa ....	17
Kuvio 5. Haihtumiskokeessa rakeistunutta tuhkaa.....	19
Kuvio 6. Sumutustesteihin käytetty laitteisto. ....	21
Kuvio 7. Sumutus putkisto. ....	23
Kuvio 8. Ruuvikuljettimelle asennetun radiometrisen kuljetinvaa'an periaatekuva ..	29
Kuvio 9. Kostutuksen periaate. ....	32
Kuvio 10. Märkä tuhka kerääntyy voimakkaasti rakenteisiin.....	33
Kuvio 11. Loss-in-Weight laitteisto jatkuvatoimiseen annosteluun. ....	39

## Taulukot

Taulukko 1. Tuhkanäytteiden punnitut massat ja lentotuhkan tiheys .....	15
Taulukko 2. Haihtumiskokeen mittaustuloksia. ....	18

# 1 Opinnäytetyön lähtökohdat

## 1.1 Opinnäytetyön tavoitteet

Opinnäytetyössä tutkittiin lentotuhkan hydratoinnin toteuttamista voimalaitoksella. Tuhkan hydratointi tarkoittaa lentotuhkan koostumuksen muuttamista sitouttamalla tuhkaan hallitusti pieni määrä vettä. Hydratoinnilla on tarkoitus helpottaa lentotuhkan käsittelyä, lisätä ja monipuolistaa lentotuhkan hyötykäyttöä sekä alentaa lentotuhkan käsittelyn kustannuksia kokonaisuudessaan.

Voimalaitoksen polttoprosessista syntyvä lentotuhka on hyvin hienojakoista ja kevyttä ainetta, jonka käsittely kuivana aiheuttaa voimakasta pölyämistä ja näin ympäristön likaantumista. Lentotuhkaan voidaan lisätä vettä, jolloin pölyämisongelma poistuu, mutta märkänä tuhka kerääntyy voimakkaasti rakenteisiin, minkä takia esimerkiksi kuljettimet vaativat runsaasti puhdistusta ja huoltoa toimiakseen. Nämä käytännön ongelmat sekä mahdollisuus tehostaa tuhkan käyttöä lannoitteena olivat syynä tutkia tuhkan hydratoimisen toteuttamista voimalaitoksella. Hydratoitumista reaktiona oli jo tutkittu, ja tulokset antoivat syitä jatkaa ilmiön soveltamista teolliseen mittakaavaan.

Opinnäytetyön päätavoite oli selvittää, onko tuhkan hydratointi tässä mittakaavassa ylipäänsä mahdollista, ja jos on, onko se mahdollista toteuttaa kustannustehokkaalla tavalla. Tutkimuksen toteuttamisessa käytettiin kvalitatiivisia eli laadullisia tutkimusmenetelmiä hydratoinnin toteuttamistavan selvittämiseksi. Tätä tutkimusta tehtiin laboratorio- ja käytännön testien avulla sekä aihetta käsittelevää teoria-aineistoa tutkien. Laitteiston mitoitukseen käytettiin myös kvantitatiivisia eli määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Mitoituksen pohjaksi analysoitiin jäteraportteja voimalaitokselta kuljetetusta lentotuhkasta. Työn tilaaja oli UPM- Kymmene Oyj:n Jokilaakson tehtaet ja työn suunnitteluosuuden kohteena oli Kaipolan voimalaitos.

## 1.2 UPM-Kymmene Oyj

UPM:n liikeideana on yhdistää bio- ja metsäteollisuus. Sen kaikki tuotteet perustuvat uusiutuviin raaka-aineisiin ja ovat kierrätettäviä. Vuonna 2015 UPM:n liikevaihto oli noin 10,1 miljardia euroa ja vuoden 2015 lopussa henkilöstöä oli 19 578 (UPM:n tilinpäätöstiedote 2015, 2-4).

### **UPM Jokilaakson tehtaat**

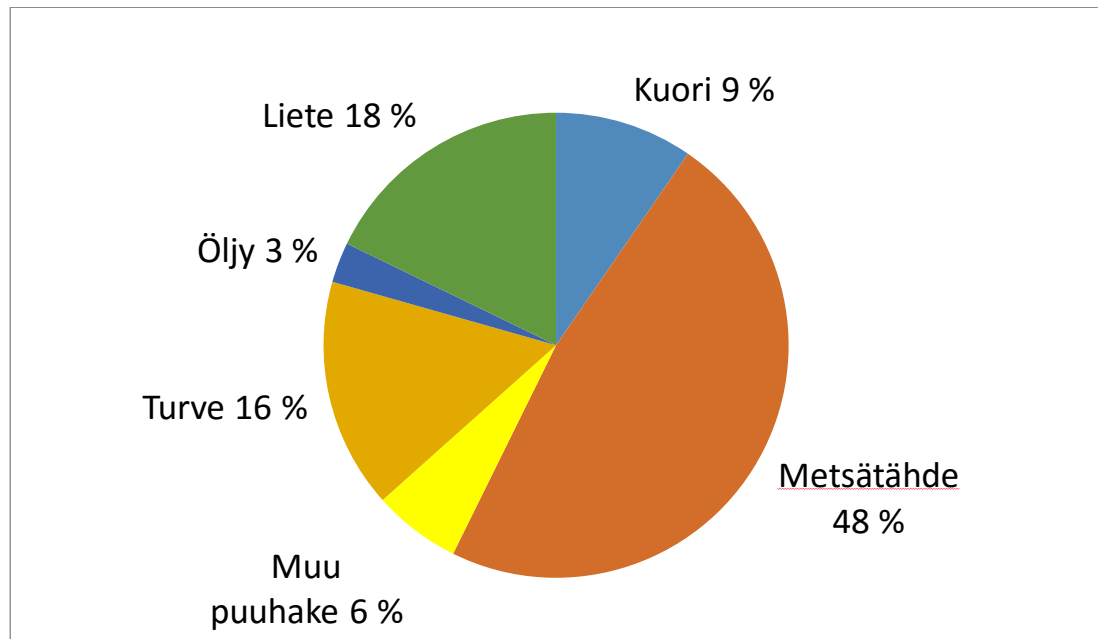
Jämsänkosken ja Kaipolan paperitehtaat muodostavat 850 henkilöä työllistävän UPM Jokilaakson tehtaat -tehdaskokonaisuuden, joka käsittää yhteensä kuusi paperikonetta. Lisäksi Kaipolassa sijaitsee siistaamo, joka käsittelee 2/3 Suomessa talteen otetusta kotikeräyspaperista erottaen siitä uudestaan paperinvalmistuksessa käytettävät kuidut. Keräyspaperin lisäksi tehtaat käyttävät paperin valmistuksen pääraaka-aineina kuusikuitupuuta, saharahaketta ja sellua. Tehtaiden kuuden paperikoneen tuotantokapasiteetti on yhteensä 1 370 000 paperitonnia vuodessa. Jokilaakson tehtailla valmistuvasta paperista yli 80 prosenttia menee vientiin. Paperin valmistuksessa tarvittavan höyryn tuottamiseksi Jämsänkoskella ja Kaipolassa on omat voimalaitoksensa, jotka tuottavat myös sähköä ja kaukolämpöä. (Jokilaakson tehtaiden esittelymateriaali 2016, 39.)

### **Kaipolan voimalaitos**

Kaipolan voimalaitoksen päätehtävä on tuottaa prosessihöyryä paperitehtaan tarpeisiin. Voimalaitos tuottaa myös sähköä höyryturbiinin avulla sekä kaukolämpöä Kaipolan taajaman alueelle. Kaipolan voimalaitoksella on pääkattilana 104 megawatin tehoinen, kiinteää polttoainetta käyttävä kupliva leijupetikattila, sekä 89 ja 41 megawatin raskasta polttoöljyä polttavat vara- ja huippukattilat. Voimalaitoksen käyttämä polttoaine on pääosin biopolttoaineita mm. kantoja, hakkuutähteitä, kuorta sekä tuotannosta syntyviä lietteitä. Lisäksi polttoaineena käytetään turvetta, jota UPM ei katso uusiutuvaksi biopolttoaineeksi, ja raskasta polttoöljyä. (Jokilaakson tehtaiden



esittelymateriaali 2016, 72.) Kuviossa 1 Kaipolan voimalaitoksen polttoaineiden käyttäjajakauma.



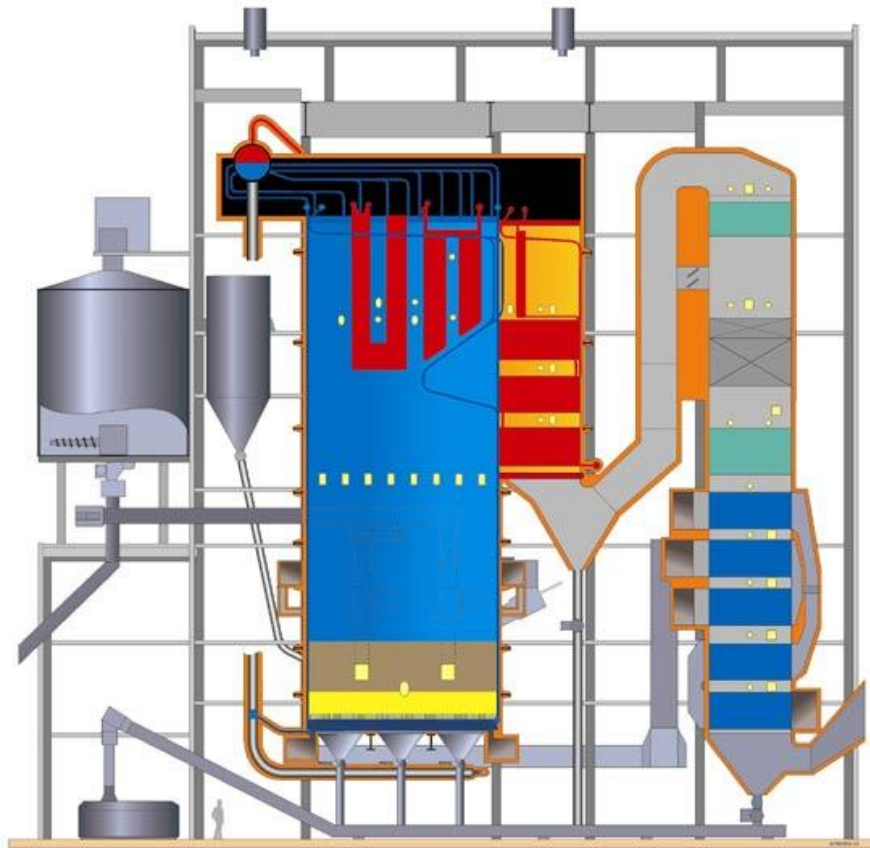
Kuvio 1. Polttoaineiden käyttäjajakauma, Kaipolan voimalaitos 2012.

## 2 Leijupoltto

Leijupoltto on yleistynyt erääksi käytetyimmistä tavoista polttaa kiinteitä polttoaineita ympäristöä säästävästi. Leijupolttotekniikan etuja ovat mahdollisuus käyttää erityyppisiä polttoaineita, edullinen rikinpoisto ja vähäiset typenoksidipäästöt (NO<sub>x</sub>). Leijupoltto soveltuu erityisen hyvin huonolaatuisille polttoaineille, joiden poltto ilman esikäsittelyä ei muilla tekniikoilla onnistuisi. Myös polttoaineen laadun nopeat ja suuretkin laatuvariaatiot ovat hyväksyttävissä. (Raiko, Saastamoinen, Hupa & Kurkisuonio 2002, 490.)

Leijupolttokattilassa polttoaine palaa petimateriaalista koostuvalla patjalla, johon puhalletaan voimakkaasti palamisilmaa alhaalta. Jos puhallettava palamisilma saa petimateriaalin vain leijumaan, käytetään nimitystä leijupetipoltto. Kiertopetipoltossa puhallus on voimakkaampi ja se vie hiekkaa ja polttoainetta mukanaan, jolloin

kiinteä aine erotetaan syklonissa ja palautetaan tulipesään takaisin. (Perttula 2000, 177.) Leijupetikattilan rakenne on havainnollistettu kuviossa 2.



Kuvio 2. Leijupetikattilan poikkileikkaus (Eskilstuna plant n.d.)

### 3 Tuhkan hyötykäyttö

Tuotettaessa energiaa polttamalla on lopputuotteena aina jonkin verran tuhkaa.

Polttoprosessin täydellisyys vaikuttaa syntyvän tuhkan määrään ja laatuun. Polttoaineissa on kuitenkin materiaalia, joka ei pala. Tuhkan muodostavat nämä polttoprosessin palamattomat aineet. Tuhkan hyötykäyttöä on viime vuosina tehostettu ja entistä pienempi määrä tuhkasta päätyy ilman hyödyntämistä kaatopaikalle.

Tuhkan hyödyntämiseen vaikuttavat sen ominaisuudet, jotka vaihtelevat käytetyn polttoaineen ja polttoprosessin mukaan. Suomessa tuhkalaadut luokitellaan niiden keräyspaikan mukaan pohja- ja lentotuhkaan. Pohjatuhkaa on kattilan pohjalle kerty-

vä tai leijupetimateriaalin mukana poistettava tuhka- ja savukaasuista erotettava tuhka- ja savukaasu on lentotuhkaa. Toinen luokittelu tapa on polttoprosessissa käytettävän polttoainekoostumuksen mukaan seospolton-, kivihiilen polton- ja rinnakkaispolton tuhkiin. (Kiviniemi, Sikiö, Jyrävä, Ollila, Autiola, Ronkainen, Lindroos, Lahtinen & Forsman 2012, 8.)

Suomen energiantuotannossa kertyi vuonna 2012 1,0 miljoona tonnia tuhkaa ja tästä yli puolet hyödynnettiin maarakenteissa ja rakennustarvikkeiden raaka-aineena (Ympäristötilasto 2014, 136-137.)

### 3.1 Tuhkan koostumus

Kiinteän polttoaineen tuhaksi kutsutaan sitä epäorgaanisen aineen seosta, joka on jäänyt jäljelle, kun polttoaine on palanut täydellisesti hapettavassa kaasukehässä (Raiko, ym. 2002, 122).

Tuhkan muodostuminen on seuraus sarjasta fysikaalis-kemiallisia tapahtumia, joissa on vaihtelua polttoaineesta ja polttotekniikasta riippuen (Raiko ym. 2002, 270). Orgaanisen aineksen palaessa siitä poistuu typpi sekä pääosin myös rikki. Epäorgaaniset aineet jäävät tuhkaan lähes samassa suhteessa, missä ne ovat olleet polttoaineessa, tällöin myös ravinteet jäävät tuhkaan. (Moilanen 2009, 2.)

Tuhkaa muodostavat ainesosat vaihtelevat polttoaineissa suuresti koostumukseltaan ja määrältään. Esimerkiksi puun rungossa epäorgaanisten ainesosien osuus on vain prosentin kymmenesosa, jotkut hiilet taas sisältävät yli 10 prosenttia tuhkaa. Puun tuhka sisältää pääasiassa alkali- ja maa-alkalimetalleja. Hiilten, turpeiden ja nopeakasvuisten biomassojen tuhassa vastaavasti pii, alumiini ja rauta saattavat olla merkittäviä aineita. (Raiko ym. 2002, 270.)

Myös voimalaitoksessa käytettävällä polttotekniikalla on vaikutusta tuhkan koostumukseen. Kattilatyypeistä yleisimmin käytettyjä ovat arinakattilat ja leijupetikattilat. Arinatuhkan reaktiivisuus ja ravinteiden liukeneminen on yleisesti ottaen hitaampaa verrattuna leijupetikattilan lentotuhkaan. Lentotuhkassa on taas enemmän raskasmetalleja kuin arinatuhkassa. (Moilanen 2009, 2.)

### 3.2 Lentotuhkan lannoiteominaisuudet

Leijukerroskattossa syntyvästä tuhkasta miltei kaikki otetaan talteen sähkösuotimilta, ja kunnolla toimivassa poltossa palamattoman aineen osuus on pieni. Leijukattiloissa pohjatuhkan osuus on noin 20 prosenttia. Leijukerroskattiloiden pohjatuhkaa ei ole järkevää käyttää lannoitteena, sen koostuessa pääosin petimateriaalista. Sen sijaan lentotuhka on ominaisuuksiltaan hyvää tähän käyttöön. (Isännäinen, Rinne, Järvelä & Lindh 2006, 7.) Metsälannoitteeksi parhaiten soveltuu puuperäinen tuhka. Puutuhka sisältää yleensä kalsiumia (Ca) 10–30 prosenttia, kaliumia (K) 2–6 prosenttia ja fosforia (P) 1–3 prosenttia kuiva-aineesta. Tuhkassa on lisäksi tärkeitä hivenravinteita, booria (B), kuparia (Cu) ja sinkkiä (Zn). Turvetuhka sisältää vähemmän kaliumia ja booria, mutta fosforia saman verran puutuhkan kanssa. Turvetuhkan arvoa lannoitteena lisäävät sen vähäiset raskasmetallipitoisuudet ja korkea rautapitoisuus. (Moi-  
lanen 2009, 2.) Ravintoaineiden, esimerkiksi fosforin ja kaliumin, määrä voi poltettavissa biomassoissa vaihdella voimakkaasti. Ravintoainemäärien vaihtelu voi johtua maaperästä, käytetyistä lannoitteista, korjuumenetelmistä ja vuodenajasta. Keväällä kasvi sisältää luonnollisesti enemmän ravintoaineita kuin syksyllä ja talvella. (Raiko ym. 2002, 270.)

## 4 Lentotuhkan jalostusmenetelmät

Tuhkan hyötykäytössä ongelmia muodostaa tuhkan hienojakoisuus ja sen kemiallisen koostumuksen vaihtelu. Käsittelemätön tuhka on hienojakoista sekä pölyävää ja sen levittäminen lannoitekäytössä on ongelmallista. Lainsäädännön asettamien ehtojen osalta teollisessa poltossa syntyvät tuhkan eivät myöskään aina täytä vaatimuksia raskasmetallien pitoisuuksien ja liukoisuuden osalta. Erilaisilla menetelmillä on kuitenkin mahdollista parantaa tuhkien ominaisuuksia. (Jutila & Hakola 2012,15.)

## **Vanhentaminen**

Tuhkan liukoisuusominaisuuksia voidaan muuttaa varastoimalla tuhkaa eli ikäännyttämällä. Varastoitaessa tuhka reagoi ilmassa olevan hiilidioksidin ja kosteuden kanssa, jolloin mm. kalsiumista muodostuu kalsiumkarbonaattia, mikä vähentää kalsiumin liukoisuutta ja laskee tuhkan pH:ta. Ikäännyttäessä myös kloridin, sulfaatin, molybdeenin, seleenin ja kromin liukoisuus laskee. (Lindroos, Ronkainen & Järvinen 2016, 21-22.)

## **Fraktiointi**

Voimalaitoksilla syntyvän tuhkan kemiallisessa koostumuksessa on suuria vaihteluita eri raekokojen välillä. Hyötykäytön suurimpana ongelmana on lentotuhkan raskasmetallipitoisuuksien vaihtelu. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että raskasmetallit rikastuvat tuhkan pienhiukkasiin. Näin raskasmetallien suurista pitoisuuksista aiheutuvia ongelmia pystytään vähentämään poistamalla tuhkasta pienimmän raekoon jae. (Jutila & Hakola 2012,15.)

## **Itsekovettaminen**

Tuhkan käsittelyssä yksinkertaisin menetelmä on itsekovetus. Menetelmässä tuhkan sekaan lisätään vettä ja kostutettu tuhka ajetaan kasaan, jossa seoksen annetaan kovettua. Itsekovetettu tuhka sisältää erikokoisia rakeita, sekä suurempia kokkareita jotka rikotaan kuormauksen yhteydessä esimerkiksi seulakauhalla. Itsekovetettu tuhka edelleen pölisee, mutta huomattavasti käsittelemätöntä vähemmän. (Makkonen 2008, 9.)

Itsekovettaminen on tuhkan käsittely tapana samankaltainen kuin hydratointi. Menetelmät perustuvat samaan reaktioon, mutta hydratoinnissa tuhkan kostuttaminen hoidetaan tarkemmin ja ilman mekaanista sekoittamista.

## Rakeistaminen

Tuhkaa voidaan rakeistaa muutamalla eri menetelmällä. Lautasrakeistuksessa tuhka ja vesi sekoitetaan ja kostea tuhka syötetään kaltevassa asennossa olevalle lautaselle. Lautasessa on lapa, joka pyörii vastakkaiseen suuntaan. Menetelmässä tuhka vierii kaltevaa tasoa ja muotoutuu palloiksi. Palloiksi muotoutunut tuhka menee lautasen reunan yli kuljettimelle. (Korpilahti 2003, 12.)

Rumpurakeistuksessa kostutettu tuhka rakeistuu valuessaan suuren sylinterin seinä-mältä pohjalle. Sylinteri asennetaan kaltevasti, jolloin tuhka kulkeutuu sen läpi ja samalla muotoutuu pyöreiksi rakeiksi. (Korpilahti 2003, 13.)

## 5 Hydratoitu tuhka

### 5.1 Tuhkan hydratoinnin periaate

Hydratointi on patentoitu lentotuhkan käsittelymenetelmä. Lentotuhkan molekyylit ovat suurelta osin oksidimuodossa ja tuhkaseos on reaktiivinen veden kanssa. Kun tuhkaan lisätään vettä siten, että loppukosteus on 6–9 painoprosenttia, tapahtuu hydratoitumisreaktio. Tuhkan ja veden reaktio on eksoterminen, joten reaktiossa vapautuu lämpöä. Hydratoinnissa vesi ( $H_2O$ ) sitoutuu tuhkan oksideihin ja ioneihin muodostaen mm. kalsiumin kanssa kalsiumhydroksidia. Tämän lisäksi vettä sitoutuu kidevedeksi tuhkapartikkelien ja molekyyliden muodostaessa uusia kiteitä ja partikkeleita. Poolisuutensa vuoksi vesi kiinnittyy ioneihin myös dipoli-ionisidoksin. Lisäksi mineraalit ja mikrokiteet yhdistyvät suuremmiksi mikrorakeiksi, jolloin tuhkan raeko-ko kasvaa. (Halonen 2016.) Eksotermisen reaktion aiheuttaman lämpenemisen takia lisätystä vedestä suurin osa haihtuu vesihöyrynä. Siksi vettä on lisättävä loppukosteutta huomattavasti suurempi määrä, testien perusteella noin 30–40 prosenttia seoksen yhteispainosta.

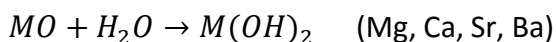
## 5.2 Hydratointi kemiallisena reaktiona

Hydratoinnissa reaktiot vastaavat poltetusta kalkista eli kalsiumoksidista (CaO) esitetävää hydratointiesimerkkiä seuraavasti:



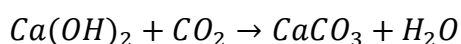
Kalsiumoksidimolekyyli reagoi hydratoinnissa veden ( $H_2O$ ) kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia  $Ca(OH)_2$ . Reaktio ”sammuttaa” kalkin.

Reaktio on seuraava:



### Lujittuminen

Hydratoinnissa tapahtuu lujittuminen vedestä ja ilmasta saatavan hiilidioksidin reaktiolla seuraavasti, esimerkkinä kalsiumhydroksidi ( $Ca(OH)_2$ ):

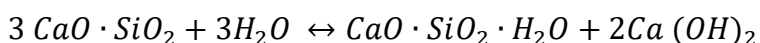


Lopputuote on kalsiumkarbonaattia ( $CaCO_3$ ) ja vesihöyryä. (Holtzclaw, Robinson, & Odom 1991, 47, 389-399, 830).

### Sitoutumisreaktiot

Halonen (2016b) kertoo, että hydratoinnissa tapahtuu myös sitoutumisreaktioita, jolloin syntyy kidemäisiä ja amorfisia aineita. Esimerkiksi (CaO) sitoutuen piioksidin ( $SiO_2$ ) ja veden ( $H_2O$ ) kanssa, jolloin muodostuu amorfista kalsiumsilikaattihydraattia ( $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ ) sekä kalsiumhydroksidia ( $Ca(OH)_2$ ). Sidos sisältää pienen määrän vettä.

Reaktioyhtälö on seuraava:

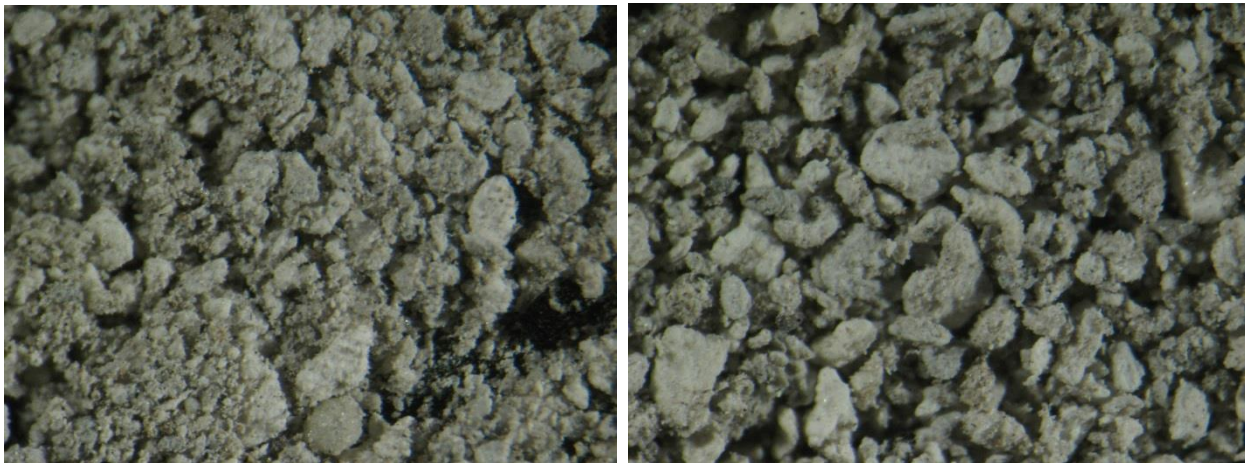


Kokonaisuudessaan tuhkan hydraatio on monimutkainen tapahtuma, jonka lopputuotteista osa on kiteisiä ja osa kidemuodottomia.

### 5.3 Hydratoinnin edut

Hydratoinnissa tuhkaan sitoutuu vettä, mutta lopullinen vesimäärä on kuitenkin niin vähäinen, 6–9 painoprosenttia tuhkan ja veden yhteismäärästä, ettei se juurikaan lisää tuhkan massaa. Hydratoinnissa tuhkan reaktiivisuus vähenee ”sammutuksen” seurauksena ja myös tuhkan liukenevuus vähenee.

Tuhkan hydratoinnilla saavutetaan useita merkittäviä etuja käsittelemättömään tuhkaan verrattuna. Hydratoitu tuhka ei pölyä käsittelyssä ja konelevityksessä juurikaan, mistä on etua sekä voimalaitoksella tuhkan purkamisessa että myöhemmässä hyötykäytössä. Tuhka myös säilyy tasarakeisena, tämän takia siihen on yksinkertaista lisätä ravinteita lannoitekäytössä. Tasalaatuisena rakeena tuhka on helppoa levittää ilman erityisiä koneita. Tuhkalle ei myöskään tarvitse tehdä lisäkäsittelyjä, esimerkiksi rakeistaa tai murskata. Tuhkan liukenevuus myös vähenee, minkä seurauksena metsään lannoitteeksi levitetty tuhka luovuttaa ravinteitaan tasaisemmin pidemmällä ajanjaksolla. Hydratoitaessa tuhkan pienin raekoko muodostaa suurempia rakeita mikroskooppikuvan (ks. kuvio 3) mukaisesti. Tämä on yksi syy miksi tuhkan pölyäminen ratkaisevasti vähenee.



Kuvio 3. Mikroskooppikuva käsittelemättömästä ja hydratoidusta lentotuhkasta.



Hydratoitua tuhkaa voidaan varastoida ulkona kasoissa. Tuhkan pintaan muodostuu ohut kuori, joka estää sadeveden tunkeutumisen tuhkakasaan ja säilyttää näin kasan kovettumattomana.

Hydratoinnin vaikutus haitallisten aineiden liukenevuuteen on samankaltainen kuin tuhkan vanhentamisen, joka perustuu samaan reaktioon. Tuhkan vanhentaminen sitoo haitallisia aineita, kuten bariumia (Ba) ja fluoridia (Kiviniemi ym. 2012, 10). Jyväskylän yliopistossa tehdyt liukenemiskokeet luonnon olosuhteissa pitkällä aikavälillä (L/S 10) osoittavat myös bariumin liukenemisen vähenevän viidennekseen hydratoitaessa (Halonen 2004). Liukenevuusanalyysin tulokset ovat liitteessä 3.

Kaipolan voimalaitoksen tapauksessa juuri bariumin raja-arvot ovat lähellä sallittuja ja kuivan tuhkan osalta arvot ylittävät sallitun. Hydratointi on yksi ratkaisu liukenevuuden vähentämiseen.

## 6 Tutkimusosuus

Tuhkan hydratointia oli tutkittu Jyväskylän yliopistossa laboratoriotesteissä ja tulokset olivat lupaavia. Testeissä oli kuitenkin selvitetty vain onnistuneen reaktion vaikutuksia tuhkaan ja testit oli tehty pienillä määrillä sekä teolliseen sovellukseen nähden optimiolosuhteissa. Hydratoinnin vaatimusten selvittämiseksi oli siis testattava ja selvitettävä useita asioita.

### 6.1 Lentotuhkan tiheys

Laskelmien ja testien edellytyksenä oli tietää lentotuhkan tiheys, jotta vettä ja tuhkaa voitiin käsitellä saman suureen eli massan avulla. Tämä suoritettiin ottamalla lentotuhkasiilosta kuivaa tuhkaa. Purkamisen ja kuljettamisen seurauksena tuhka voi tiivistyä, niin kuin tässäkin tapauksessa oletettavasti tapahtui. Tuhkan tiivistymisen nähtiin olevan arviolta kuitenkin samansuuntaista, kuin se tulisi prosessissa olemaan,

joten tiheyden määrittämisen tuloksia voidaan pitää käyttötarkoitukseen nähden oikeina. Tiheys laskettiin kaavan 1 mukaisesti.

$$\text{tiheys} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{massa kg}}{\text{tilavuus m}^3} \quad (1)$$

Tilavuus selvitettiin punnitsemalla kymmenen 500 millilitran näytettä ja laskemalla näiden massan keskiarvo. Taulukossa 1 ovat punnituksen ja laskelmien tulokset.

Taulukko 1. Tuhkanäytteiden punnitut massat ja lentotuhkan tiheys

Massa g	Tilavuus ml
445,59	500
426,68	500
427,76	500
441,24	500
432,27	500
441,95	500
406,29	500
438,83	500
427,34	500
415,63	500

	Massa	Tilavuus	Tiheys	
keskiarvo	430,358	500	0,860716	g/ml
	0,430358	0,0005	860,716	kg/m <sup>3</sup>

Lentotuhkan keskimääräiseksi tiheydeksi saatiin näin 861 kg/m<sup>3</sup>, otoksen keskihajonta oli 11,8 grammaa, jolloin tiheyden vaihteluväli on +/- 23,4 kg/m<sup>3</sup>.

Lentotuhkan tiheyteen vaikuttaa luultavasti myös käytettyjen polttoaineiden seossuhteen vaikutus tuhkan koostumukseen. Tuhkan tiheys on kuitenkin tehtävissä helpposti. Tämän takia hydratointijärjestelmää käytettäessä on järkevää, polttoaineiden

trendin muuttuessa, määrittää kulloisenkin polttoaineseoksen tuottaman tuhkan tiheys. Mittausten tuottamalla seuranta-aineistolla saataisiin tiheyden vaihteluväli määritettyä ja arvioitua sen vaikutuksia prosessiin.

## 6.2 Hydratointikokeet

### 6.2.1 Kuumen tuhkan vaikutus lisätyn veden haihtumiseen

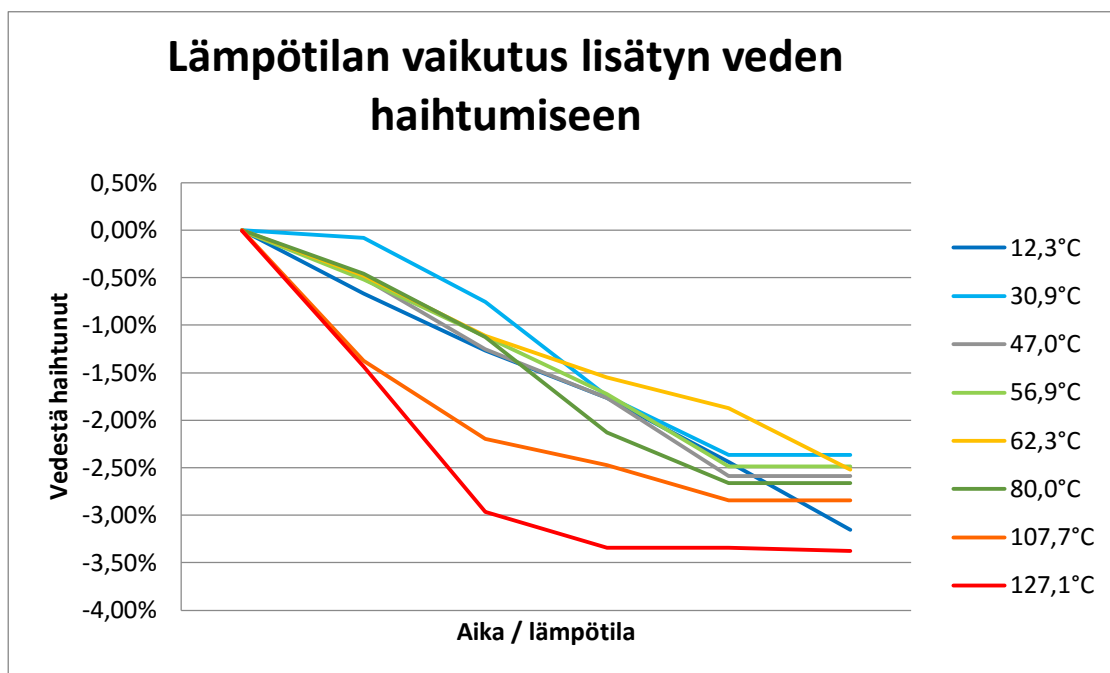
Halonen on analysoinut tuhkan hydratointia ja reaktiossa haihtuvaa Jyväskylän yliopistossa 2014. Analyysit on tehty vakio-lämpötiloissa olevalla tuhalla ja lietteellä lisättyä kosteutta muuttamalla. Veden haihtuminen hydratointireaktion seurauksena oli näin selvillä, analyysin tuloksia on liitteessä 2.

Hydratoitavan tuhkan lämpötila voi kuitenkin vaihdella useasta tekijästä johtuen. Lämpötilan vaihteluväli selvitettiin tuhkan keräyksen eri kohtien lämpötilaa mittaamalla, siilossa olevan tuhkan lämpötilaa mittaamalla sekä käyttökonekunnan aikaisempien kokemusten mukaan. Lentotuhkasiilosta purettavan tuhkan lämpötilan arvioiksi vaihteluväliksi saatiin 40 °C–120 °C.

Tuhkan lämpötilan arvioitiin vaikuttavan hydratoinnissa haihtuvan veden määrään. Tämän vuoksi hydratointitestejä tehtiin lämmitetyllä tuhalla. Testit suoritettiin lisäämällä eri lämpötiloihin kuumennettuun tuhkaan vakio määrä vettä ja punnitsemalla vesi-tuhkaseoksen massan muuttumista.

Testi suoritettiin kahdeksalla näytteellä, joista kylmimmän lämpötila oli 12,3 °C ja kuumimman 127,1 °C.

Kokeessa noin 170 grammaa tuhkaa lämmitettiin uunissa haluttuun lämpötilaan ja tuhkan sekaan lisättiin hiljalleen sekoittaen vettä noin 30 grammaa eli 14 % veden ja tuhkan yhteismassasta. Vesi-tuhkaseos punnittiin ensimmäisen kerran, kun vesi oli sekoitettu tuhkan kanssa. Tästä eteenpäin seoksen lämpötilaa ja massaa seurattiin, kunnes seoksen lämpötila oli 20 °C, joka oli lähellä testitilan lämpötilaa. Tuhkanäytteiden ja lisätyn vesimäärän painoissa oli muutamien grammojen eroja. Erot olivat kuitenkin pieniä, eivätkä ne vaikuta tutkimukseen, kun asia huomioidaan tuloksien käsittelyssä.



Kuvio 4. Lämpötilan vaikutus lisätyn veden haihtumiseen tuhkan hydratoinnissa

Kuviosta 4 nähdään, että kuumissa näytteissä vettä haihtuu tuhkan jäädyttämisen seurauksena heti lisättäessä. Kylmemmissä näytteissä veden haihtuminen taas nopeutuu hydratointireaktion edetessä. Yleisesti tuloksia tarkasteltaessa nähdään, että odotetusti vettä haihtuu sitä enemmän mitä kuumempi näyte on. Poikkeuksena tähän on kylmin, 12,3-asteinen näyte, jonka tulos on hyvin lähellä kuuminta, 127,1-asteista näytettä. Yhteenvedona testistä voidaan todeta, että kuumaan tuhkaan on lisättävä enemmän vettä haihtumisen kompensoimiseksi. Tuhkan jäädyttämisen seurauksena haihtuu kuitenkin aina sama määrä vettä riippumatta halutusta kosteusprosentista. Siksi on oletettavaa, että kun lisätään vettä suuremman kosteusprosentin vaatima määrä, lämpötilan vaikutus haihtumiseen prosentuaalisesti vähenee lisätyn vesimäärän suurentuessa.

### 6.2.2 Haihtumiskoe

Testillä selvitettiin hydratointitilan vaatimuksia ilmanvaihdon tai ilmatiiviyyden kannalta. Pienen mittakaavan hydratointikokeissa oli epäily kosteuden haihtumisesta kuivempaan ympäristöön. Haihtumisen ja kosteuden viipymisajan vaikutusta hydratointumiseen testattiin kostuttamalla tuhkanäytteitä samalla vesimäärällä ja peittämällä

toinen näytteistä muovikelmulla ilmatiiviiksi. 2 tunnin kuluttua tuhkanäytteiden kostuttamisesta muovikeltu näytteiden päältä poistettiin ja tässä vaiheessa mitattiin myös näytteiden massa. Näytteiden annettiin tämän jälkeen kuivua kaapissa, joka ei ollut täysin tiivis, mutta esti vapaan ilmavirtauksen näytteiden ympärillä. 12 tunnin kuluttua näytteiden massa punnittiin seuraavan kerran. Viimeisen kerran näytteet punnittiin 6 vuorokautta veden ja tuhkan sekoituksen jälkeen. Taulukossa 2 on esitetynä osa mittaustuloksista, joista nähdään näytteiden kuivumisen jälkeinen massa-ero. Näytteet 1,2 jne. ovat peitettyt näytteet ja 1.1,2.1 jne. avonaiset näytteet.

Taulukko 2. Haihtumiskokeen mittaustuloksia.

Näyte	Laskennallinen kosteus	Tuhka g	Vesi g	Massa sekoituksen jälkeinen g	Mittaus 6 vrk Massa g	Massan muutos	Avonaisen ja peitetyn näytteen massan ero g	Lopullinen kosteus %
1	9 %	162	16	177	173	4		6,5 %
1.1	9 %	162	16	177	172	5	1,0	6,0 %
2	15 %	161	30	190	176	14		8,3 %
2.1	15 %	161	30	190	175	15	0,7	8,2 %
3	20 %	159	40	198	175	24		8,9 %
3.1	20 %	159	41	199	175	24	0,4	8,9 %
4	24 %	161	53	213	179	34		10,0 %
4.1	25 %	162	54	215	180	34	0,5	10,2 %
5	29 %	160	69	227	181	46		11,4 %
5.1	29 %	159	68	225	179	47	0,5	10,8 %
6	39 %	160	107	264	190	74		15,7 %
6.1	40 %	159	107	264	187	77	2,8	14,9 %

Haihtumiskokeessa havaittiin, että näytteiden peittäminen vaikuttaa veden imeytymiseen. Ero peitetyn ja avoimen näytteen välillä oli kuitenkin hyvin pieni, noin 1 prosentti lopullisessa kosteudessa kuuden vuorokauden kuivumisen jälkeen.

Testissä huomattiin näytteiden, joihin lisättiin suuri määrä (40 %) vettä, rakeistuneen kuvion 5 mukaisesti todella hyvin jatkokäytön kannalta. Epäilyksenä oli kuitenkin mekaanisen sekoittamisen vaikutus rakeiden muodostumiseen.



Kuvio 5. Haihtumiskokeessa rakeistunutta tuhkaa.

### 6.2.3 Sumutuskokeet

Ensimmäiset hydratointikokeet tehtiin hyvin pienessä mittakaavassa, lisäämällä haluttu vesimäärä tuhkan sekaan käsin sekoittamalla. Tuhkan ja veden sekoittaminen vastaavasti ei kuitenkaan ole suuremmassa mittakaavassa vastaavasti mahdollista.

Ratkaisuvaihtoehtona oli kokeilla tippuvan tuhkan kostuttamista vesisuihkulla. Sumutuskostutuksen kokeilemista varten rakennettiin laitteisto, jonka avulla saatiin tasainen ja toistettavissa oleva materiaalivirta. Näin muuttujat testissä voitiin rajata vesimäärään ja sen lisäystapaan.

#### Kostutuskoe 1

Sumutustestissä vesi lisättiin kuljettimelta tippuvaan tuhkaan yhdellä vesisuihkulla, joka oli suunnattu 90 asteen kulmaan tuhkavirran suhteen. Vettä lisättiin määrä, joka vastasi 25 % kosteutta sekoituksen jälkeen. Ensimmäinen ongelma havaittiin heti.

Lentotuhka on kevyttä, noin  $860 \text{ kg/m}^3$  ja paineella lisättävä vesi sai aikaan lähes sa-

man tuloksen, kuin tippuvaan tuhkaan olisi suihkutettu paineilmaa, vesisuihku vain levitti tuhkaa.

### Kostutuskoe 2

Pölyämisen estämiseksi laitteeseen lisättiin putki, jossa sumutus tapahtuu. Suljetussa kastelussa tuli ilmi odotettu ongelma; osa tuhkasta kastuu liikaa putken seiniä pitkin tippuvan veden takia ja osa tuhkasta jää aivan kuivaksi. Tuhkan ominaisuudet kastelun haasteena huomattiin testeissä siis välittömästi.

### Kostutuskoe 3

Sumutusta kokeiltiin myös sumuttamalla vettä vastakkaisista suunnista tuhkan tippuessa vesisuihkun läpi. Tällä tavoin kasteltu tuhka näytti ensin hyvältä reaktion onnistumiseksi ja seos lämpeni, eli hydratoitumisreaktio alkoi. Vuorokauden kuivuttuaan tuhka kuitenkin edelleen pölysi liikaa. Tuhkan kosteutta ei tarkasti voitu todeta, avoimesta kostutustilasta johtuvan tuhkan ja kasteluveden osittaisesta leviämisestä muualle kuin näyteastiaan.

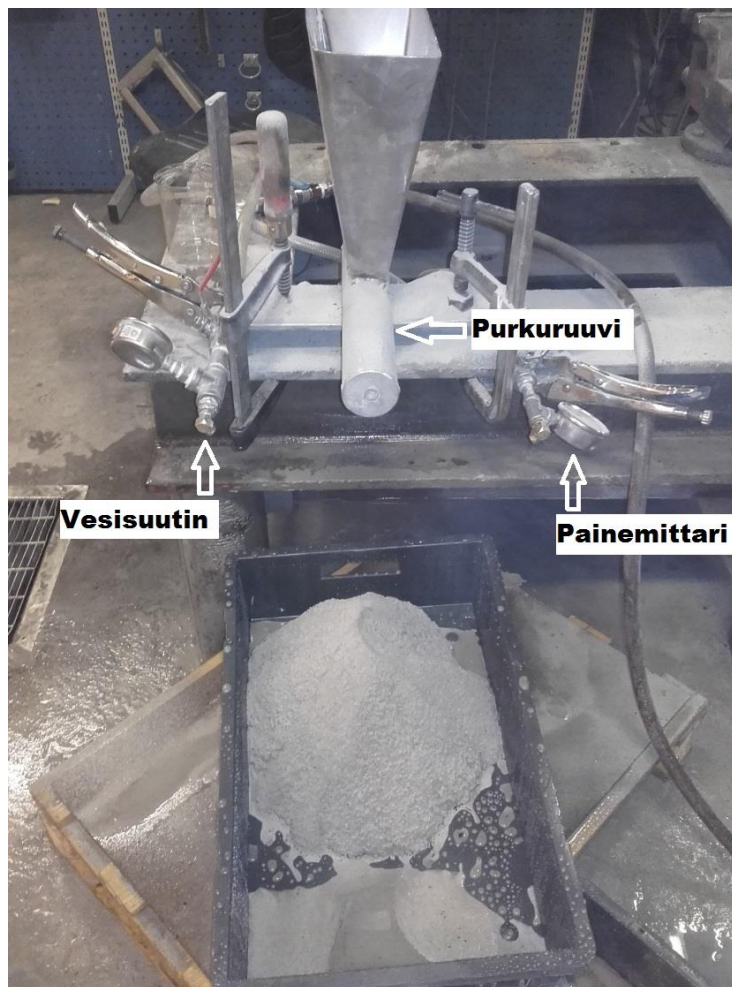
### Kostutuskoe 4

Tuhkan kastelua testattiin lisäksi ajamalla tuhkaa ruuvista ja kastelemalla tippunut tuhka samanaikaisesti oskilloivaa liikettä tekevillä kahdella viuhkasumuttimella. Periaatteena kerros tuhkaa ja kerros vettä, tosin kummankin materiaalin jatkuvalla virralla. Tällä tavoin tehtiin kaksi testiä, sekoituksen jälkeisillä kosteuksilla 32 % ja 38 %.

Tämän testin tuloksena saatiin hydratoitua tuhkaa, lopputuloksen ollessa täysin pölyämätöntä, raekooltaan hiekkaan verrattavissa olevaa ainetta. Seokseen ei myöskään kohdistunut minkäänlaista muuta mekaanista liike-energiaa, kuin tippuva tuhka ja sumutettava vesi. Tämän tyyppinen kostutus olisi siis mahdollista toteuttaa myös suuremmassa mittakaavassa.

### Kostutuskoe 5

Edellisen testin hyvien tuloksien pohjalta valittiin tapa kastella tuhkakasan pintaa, eikä vain tippuvaa tuhkaa. Tässä testissä haluttiin kokeilla kostutusta paikoillaan pysyvillä sumutussuuttimilla. Suuttimet vaihdettiin viuhkasuuttimista pyöreään suihkun tekeviin suuttimiin ja testi toistettiin muuten samanlaisena, kuviossa 6 on esitetty testin toteutus.



Kuvio 6. Sumutustesteihin käytetty laitteisto.

Testin tuloksena oli tuhkaa, joka vastasi edellisen testin tuloksena saatua koostumusta. Negatiivinen tapahtuma testissä oli, että samaan kosteuteen pääsemiseksi vettä oli sumutettava enemmän, koska nyt oskilloivaa sumutusta suurempi osa vedestä valui kasaan pintaa pitkin astian pohjalle. Vesisuihkun liikkuesssa kasan päälle muodostuu kuiva tuhkakerros, jonka suihku kastelee, kiinteällä suihkulla näin ei tapahdu.



Suuttimien suuremman tuoton takia vedenpaine oli pienempi ja tämän takia vesisuihkun pisarakoko suurempi.

#### *Kostutuskoe 6*

Testissä 6 asetettiin yksi sumutussuutin tuhkan purkuaukon kohdalle ja suunnattiin alaspäin osoittamaan tuhkakasan päälle. Yhdellä samankokoisella suuttimella, kuin testissä 5, voitiin vedenpainetta lisäksi kasvattaa ja saada näin aikaan vesisuihkun pienempi pisarakoko.

Tuloksena saatiin muitakin kasaa kastelevia testejä vastaava lopputulos. Veden hukkaan valuminen jäi kuitenkin pienemmäksi.

#### 6.2.4 Prototyyppi

Pienen mittakaavan testien lopputulosten onnistuttua, oikeanlaisen kostutustavan löydyttyä, rakennettiin näiden tulosten perusteella luonnollisen kokoluokan testilaitteisto. Tuhkan märkäpurussa pölynsidontaa varten rakennettua laitteistoa muokattiin hydratoinnin vaatimaa veden suihkutusta varten kuvion 5 mukaiseksi. Suihkuputkistoon lisättiin 5 suurempaa suutinta, sekä putkistoon tarvittavat venttiilit ja painemittaus suihkutuksen säätämistä varten. Testissä tuhkaa ajettiin kuivana märkäpurkuruuvien läpi lavalle ja kostutettiin suunnittelulla suihkutuspukistolla. Ruuvien tuotto kokeiltiin punnitsemalla mitatussa ajassa puretun tuhkan massa, tuotoksi saatiin 610kg/min. Erillisen hydratointiprosessin tuhkan siirto ja kostutusnopeudeksi on suunniteltu 940 kg/min, joten testi on hyvin lähellä oikeaa kokoluokkaa. Veden määrä testissä saatiin asetettua tilavuusvirran mukaan, joten laitteisto oli hyvin säädettävissä. Testejä prototyypillä tehtiin useita, osassa testeissä kuitenkin vain selvitettiin karkeita säätöjä ja näitä kokeita ei ole raportoitu.



Kuvio 7. Sumutus putkisto.

### ***Prototyypitesti 1***

Ensimmäisissä isomman mittakaavan testeissä tuhkaa purettiin pyöräkuormaajan kauhaan noin 1,5 tonnia ja kasteltiin suihkutuspukistolla. Kostutettu tuhkan kaadettiin kasoihin asfaltti pihalle. Näytteitä ei peitytty, mutta ensimmäisten 16 tunnin aikana ei satanut vettä, jolloin reaktio ehti tapahtua suunnitellusti. Kauhan mallista johtuen osa vedestä valui kauhan pohjalle, mikä aiheutti sen, että osa tuhkasta kastui liikaa ja osa tuhkasta jäi kuivemmaksi. Testit tehtiin kahdella eri vesimäärällä, mutta muuten samoin asetuksin.

Suuttimet olivat

1. 4 kpl Fulljet ½ HH-35W 5,5 bar 34,5 l/min 108°
2. 1 kpl Fulljet 1 ½ HH-24W 5,5 bar 265 l/min 119°.

### **Erä 1:**

Tuhkaa 610 kg/min, vettä 216 l/min, kosteus 26 %

Lopputulos: Noin 40 prosenttia näytteestä hyvin rakeistunutta, osa tuhkasta jäi liian kuivaksi hydratoinnin onnistumisen kannalta.

**Erä 2:**

Tuhkaa 610kg/min, vettä 285 l/min, kosteus 32 %

Lopputulos: Näytteessä hyvin hydratoitunutta tuhkaa, liian märkää tuhkaa ja pieni määrä täysin kuivaa tuhkaa.

Testien perusteella tasaiselle alustalle purettu ja kostutettu tuhka, voidaan hydratoida prototyypin mukaisella tavalla kostuttamalla, ja tuloksena on oletettavasti parempi lopputulos, kun kauhan aiheuttamia ongelmia ei ole.

**Prototyypitesti 2**

Ensimmäisessä suuremman mittakaavan testissä tuhkaa pystytettiin hydratoimaan, mutta käsittelyn tulos jäi epätasaiseksi, koska kastelun jälkeen osa tuhkasta oli kuivaa, osa taas liian märkää. Tähän vaikutti tuhkan purkaminen kauhaan ja tästä johtuva veden valuminen kauhan pohjalle. Epätasainen kostutus saattoi johtua myös pienemmän mittakaavan testeissä havaitusta asiasta nimittäin vesisuihkun väärästä pisarakoosta, joka matalasta vedenpaineesta johtuen jäi liian suureksi. Prototyypitestiä 2 varten keskellä olevan ison suuttimen (265 l/min 5,5 bar paineella) tilalle vaihdettiin kolme pienempää suutinta (veden paine 3,5 bar, virtaus 285 l/min).

Suuttimet olivat:

- 7 kpl Fulljet ½ HH-35W 5,5 bar 34,5 l/min 108°

Tuhkaa oli jälleen 610kg/min, vettä 285 l/min ja kosteus 32 %

Testin lopputuloksena saatu tuhka oli hyvin lähellä aikaisempaa testiä. Suuremman paineen aiheuttamalla pienemmällä pisarakoolla irtonaisen veden määrä kostutuksen jälkeen oli hieman vähäisempää, ero ei kuitenkaan ollut merkittävä.

### Prototyypitesti 3

Viimeisessä prototyypitestissä hydratoitiin 10 tonnia tuhkaa. Tuhka purettiin ja kostutettiin kuorma-auton lavalle, josta tuhka kipattiin kasaan ja peitettiin pressulla, ettei näyte kastu mahdollisen sateen takia liikaa.

Tuhkaa oli jälleen 610kg/min, vettä 348 l/min ja kosteus 36 %.

Tässä testissä hydratoitu tuhka onnistui paremmin kuin aikaisemmat prototyypit. Suurempi tuhkamäärä vähensi kostutuksen aloittamisen ja lopettamisen aiheuttamia vaihteluja tuhkan ja veden määrässä, jolloin lopputuloksena oli tasaisemmin kostutettua tuhkaa. Tähän erään lisättiin myös hieman kostutusveden määrää.

Prototyypitesteissä käytetyt veden ja tuhkan määrät ovat hyvin lähellä suunniteltua kiinteää järjestelmää, tästä syystä prototyypitesteissä käytetyt suuttimet ovat hyvä lähtökohta suunnittelulle.

### 6.3 Kuormaustesti

Prototyypitesteissä hydratoitu tuhka kuormattiin pyöräkuormaajalla kuorma-auton lavalle, jolloin nähtiin käytännössä kuinka paljon tuhka pölyäisi konekuormauksessa. Kuormattava tuhka oli useasta testistä saatua ja vaihteli hieman koostumukseltaan. Tuhka oli kuivunut keskimäärin viikon ajan hydratoinnin jälkeen, näin tuhkassa oli enää hyvin vähän irtovettä. Tuhkakasaa lapiolla ja käsin tutkimalla tuhka vaikutti kuivalta. Jatkuvasa hydratointijärjestelyssä tuhka sisältäisi kuormauksen tapahtuessa enemmän sitoutumatonta vettä.

Kuormatessa tuhkasta irtosi pölyä. Pölyn määrä oli kuitenkin niin vähäinen, ettei siitä aiheudu haittaa käsittelyssä. Tuhkan kuormannut, tuhkaa säännöllisesti käsittelevä kuljettaja luonnehti tätä tuhkaerää erittäin hyväksi käsitellä. Käsittelemätön läjitetty tuhka pölyää käsittelyssä niin voimakkaasti, että kuormauksessa pitää ajoittain hyödyntää tuulen suuntaa näkyvyyden säilyttämiseksi. Sivusta seurattuna kuormausta voisi kuvailla pölyämisen kannalta kuivan hiekan kuormaamiseksi.

## 7 Hydratoinnissa vaadittavat laitteet ja rakenteet

### 7.1 Kuljettimet

#### Kuljetinvaihtoehdot

Tuhkan siirtämisessä lentotuhkasiilosta hydratointilaan on tärkeimpänä vaatimuksena estää tuhkan pölyäminen ympäristöön. Tuhkan siirtämiseksi on kaksi mahdollisuutta, joilla on omat hyvät ja huonot puolensa.

Jos hydratointitila rakennetaan hyvin lähelle lentotuhkasiiloa, on tuhka mahdollista siirtää tilaan ruuvikuljettimella. Umpinaisella ruuvikuljettimella pölyäminen olisi helposti estettävissä ja materiaalivirta tarkasti säädettävissä. Ruuvikuljettimella on kuitenkin puutteita, kuten suuri huollon tarve ja huono energiatehokkuus esimerkiksi hihnakuljettimeen nähden.

Hihankuljetin olisi käytön ja huollon kannalta edullinen ratkaisu, mutta kuivan tuhkan erittäin voimakas pölyäminen aiheuttaa haasteita tämäntyyppiselle kuljettimelle.

Kaipolan voimalaitoksen tapauksessa kuljetettava matka ei määrittele suoraan kuljettimen tyyppiä, koska hydratointitilan sijoittamiselle on hyvin tilaa voimalaitoksen ja lentotuhkasiilon ympäristössä.

#### Ehdotettu kuljetinratkaisu

Tuhkan siirtäminen on luultavasti toteutettavissa sekä ruuvi- että hihnakuljettimien avulla. Siilosta purettava tuhka nostetaan ruuvikuljetin avulla hihnakuljettimelle, joka siirtää tuhkan hydratointitilaan. Näin ei hihnakuljetin nousukulman rajoitukset muodostu esteeksi, eikä siten jouduta kasvattamaan kuljetin pituutta, nousukulman pienentämisen takia. Tuhka siirrettäisiin hihnakuljettimella hydratointitilaan, missä se tarpeen mukaan siirrettäisiin käytettävään osaan hydratointitilaa, sen mukaan kumpi tiloista on tyhjänä.

Lentotuhkasiilosta tuhkan voidaan purkaa ruuville nykyisen tuhkan märkäpurun sulkyötimen avulla, jos päädytään purkamaan tämä vaihtoehto pois käytöstä. Tämä

olisi toteutukseltaan yksinkertaisempi ratkaisu kuin rakentaa siiloon kolmas purku-kohta.

Kuivan tuhkan pölyäminen asettaa haasteita hihnakuljettimelle ja etenkin tuhkan purkamiselle kuljettimelle. Tuhkaa on mahdollista kostuttaa ennen hihnalle purkua pölynsitomiseksi ja tämä voi osoittautua myös pakolliseksi. Kuitenkin tavoitteena on siirtää tuhka kuivana, tällöin ei muodostuisi märän tuhkan kuljettimeen kerääntymisen aiheuttamia ongelmia. Vesimäärä tässä esikostutuksessa olisi ainakin pidettävä hyvin pienenä, muuten vanhan järjestelmän vaatimasta kostutusruuvien mittavasta puhdistus- ja huoltotarpeesta ei päästäisi vielääkään eroon.

Tuhkan hihnalle purkuun voidaan rakentaa huuva, joka olisi avoin vain kuljettimen liikesuuntaan ja tarpeeksi pitkä tuhkan pölyn asettumiseen. Haasteita tähän ratkaisuun asettaa se, miten ratkaistaan reunojen tiivistys liikkuvan hihnaan kunnossapidon kannalta edullisesti.

Mahdollinen lisäaineiden lisäys tuhkaan olisi järkevin suorittaa siilosta purkavalla ruuvilla. Ruuvi sekoittaa lisäaineet tasaisesti ja umpinaisella ruuvilla aineiden lisäys olisi myös työturvallisuuden kannalta järkevää. Jos nykyinen märkäpurkuruuvi puretaan, lisäaineiden annostelulaitteisto mahtuisi luultavasti siilon alla olevaan tilaan.

Yksinkertaisin tapa tuhkan jakamiseen hydratointitilassa olisi kahteen suuntaan toimiva hihnakuljetin, joka tarpeen mukaan kuljettaisi tuhkan haluttuun hydratointitilaan. Suljetussa tilassa pölyäminen ei ole enää ongelma, kunhan pölyäminen tilaan, johon tuhkaa ei sillä hetkellä pureta, saadaan pysymään kurissa.

Ehdotetusta kuljetinratkaisusta on layout-kuva liitteessä 3.

Kosteuden siirtyminen hydratointitilasta kuljettimelle on estettävä. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi paineilmatoimisella luukulla tuhkan purkuaukossa.

Kosteutta siirtyy kuljettimella myös tuhkan purkamisen aikana koska hihnakuljettimella on runsaasti avointa tilaa, missä kosteus voi siirtyä. Kosteuden siirtymistä voidaan hillitä esimerkiksi nostamalla kuljettimeen lievä ylipaine, tuhkan pölyäminen tosin aiheuttaa haasteita myös tälle ratkaisulle.

## 7.2 Kuljettimien mitoitus

Kuljettimien mitoitukseen vaikuttaa käsiteltävän tuhkan määrä, siirtoon käytettävissä oleva aika sekä hydratoitumiseen varattava aika ja lentotuhkasiilon koko, sekä tuhkan muodostumisen nopeus voimalaitoksen polttoprosessissa. Mitoitus laskettiin etsimällä tilastoista muutaman vuoden ajalta tuhkamäärän kannalta suurimmat kuukaudet. Suurimman kuukauden, tammikuun 2013 tuhka-kuormat syötettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan ja näin löydettiin suurin päivän aikana voimalaitokselta purettu tuhkamäärä. Puretusta tuhkamäärästä ei erikseen tilastoida märkänä ja kuivana purettua tuhkaa. Märkäpurussa tuhkaan lisätään kuitenkin 10 – 20 % prosenttia vettä, jolloin polttoprosessista muodostuva tuhkamäärä on jonkin verran pienempi kuin purettu tuhkamäärä, siksi tästä tilastoidusta tuhkamäärästä on poistettava 10 % todellisen määrän saamiseksi.

Tuhka siirretään hydratointitilaan kerran vuorokaudessa. Siirto mitoitetaan kestämään kuusi tuntia ja tänä aikana on siirrettävä  $355 \text{ m}^3$  tuhkaa eli  $60 \text{ m}^3$  tunnissa. Tämä mitoitus perustuu tuhkamäärältään suurimpaan tilastoituihin vuorokauteen.

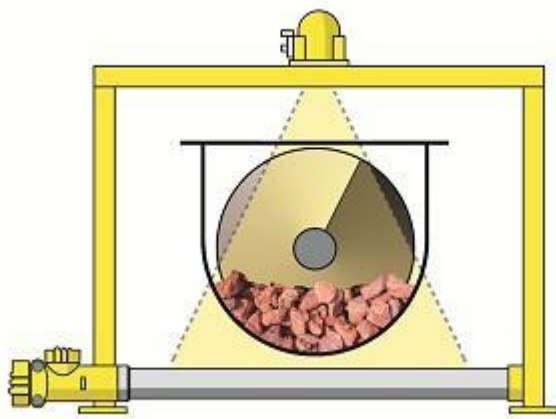
## 7.3 Tuhkan kostutuksen toteuttaminen

### 7.3.1 Mitoitus

Kostutusveden maksimimäärää selvittäessä lähtökohdaksi otettiin tuhkamäärältään suurin päivä, 305 tonnia lentotuhkaa. Veden massavirtauksen määrä on verrannollinen hydratointitilaan siirrettävän tuhkan siirtonopeuteen. Jos tämä laskennallinen tuhkamäärä siirretään ja samalla kastellaan haluttuun kosteuteen 35 %:ia, saadaan vaadittavaksi maksimivesimääräksi 460 litraa minuutissa. Putkiston mitoituksessa kannattaa käyttää varmuuskerrointa, ettei hydratoitavan tuhka määrän kasvessa tai prosessin nopeutuessa, vesimäärä muodostu pullonkaulaksi. Saatavilla olevan vesimäärän riittävä kapasiteetti myös varmistaa riittävän paineen sumutuksen onnistumiseksi.

### 7.3.2 Tuhkan määrän mittaaminen

Radiometrisellä kuljetinvaa’alla voidaan mitata ruuvi- tai hihnakuljettimen kuljettama ainemäärä. Laite muodostuu säteilylähteestä ja kuljettimen vastakkaisella puolella sijaitsevasta säteilynilmaisimesta. Säteilylähteestä lähtee kohti ilmaisinta kuljettimen levyinen säteilykeila kuvion 8 mukaisesti. Kun ainemäärä kuljettimella kasvaa, säteily vaimenee enemmän. Säteilyn vaimenemiseen vaikuttaa mitattavan aineen tiheys, ainekerroksen paksuus ja leveys, eli kuljettimella olevan aineen massasta kuljettimen pituusyksikköä kohti (kg/m). Kun tiedetään aineen kulkunopeus kuljettimella, voidaan laskea kuljettimen tietyssä aikayksikössä kuljettama ainemäärä. (Väisälä, Korpe- la & Kaituri n.d. 274.)



Kuvio 8. Ruuvikuljettimelle asennetun radiometrisen kuljetinvaa’an periaatekuva (Kola- ja ruuvivaakojen esittely 2014).

Hydratointia varten tuhkan massavirta on myös laskettavissa siirtämisessä käytettävien ruuvikuljettimien kuljetusnopeuden mukaan. Tarkkojen määrien saaminen saat- taa vaatia testejä kuljettimella, mutta niin luultavasti vaatisi myös kuljetinvaa’an ka- librointi. Ruuvikuljettimen siirtonopeuteen perustuva määränmittaus on tarpeeksi tarkka tähän sovellukseen, jossa kuljettimia käytetään aina vakionopeudella.



### 7.3.3 Veden määrän mittaaminen

Tuhkan kostutukseen tarvittavan veden määrä voidaan mitata suhteellisen edullisesti ja luotettavasti sähkömagneettisella virtausmittarilla.

Sähkömagneettisia virtausmittareita käytetään sähköä johtaville nesteille, nesteen johtokyvyn ollessa vähintään 5 µs/cm. Mittaus toimii sähkömagneettisen induktion perustuen. Sähkömagneetit saavat aikaan magneettikentän, minkä läpi virtaava väliaine synnyttää jännitteen. Jännitteen kasvu seuraa virtauksen kasvua kaavan 2 mukaisesti. (Magneettisten mittareiden esittely n.d.).

(2)

$$U = B * I * V$$

jossa

U = indusoitunut jännite

B = magneettivuon tiheys

I = mittaelektrodin etäisyys

V = väliaineen virtausnopeus. (Magneettisten mittareiden esittely N.d.).

Mittarin elektroniikka laskee syntyneen jännitteen ja mittausputken poikkipinta-alan perusteella putken läpi kulkevan tilavuusvirran.

### 7.3.4 Kosteuden mitta

Tuhkan kosteus hydratoinnin jälkeen voidaan todeta ISO 589 mukaisella uuni-kuivausmenetelmällä näytteen massamuutoksesta (ks. kaava 3). Kuivaus 105 asteisessa uunissa 12 tuntia.

$$Kosteus \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Hydratoidusta tuhkasta on otettava varsinkin alkuvaiheessa jokaisesta erästä kosteusnäytteitä, jotta voidaan taata tuotteen tasalaatuisuus.

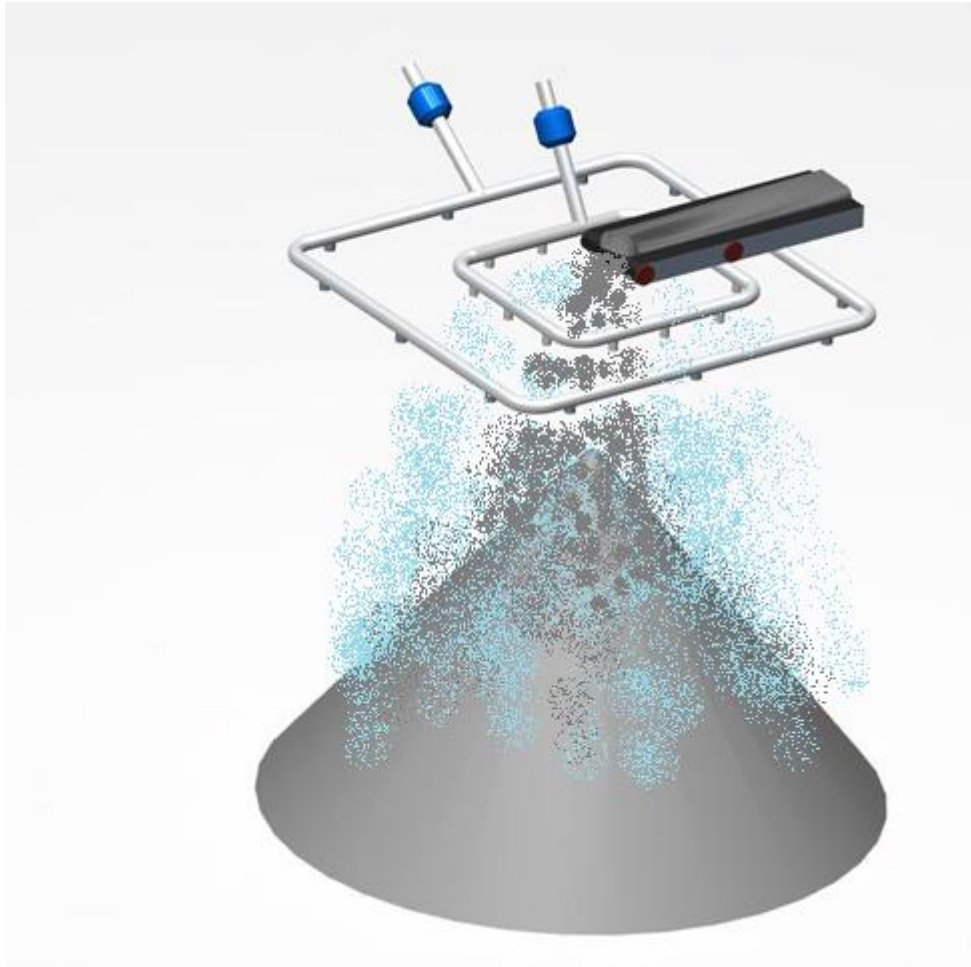
### 7.3.5 Veden lisääminen tuhkaan

#### **Sumukostutus**

Hydratointiprosessin onnistumisen kannalta on tärkeää, että mahdollisimman tarkasti jokainen tuhka hiukkanen pääsee kostetukseen veden kanssa. Tuhkalla on tätä tavoitetta haittaavia ominaisuuksia, lisättäessä vesi ei käytännössä lainkaan imeydy tuhkassa eteenpäin. Jos tuhkan päälle kaataa vettä, muodostuu kasteltuun kohtaan muutamassa minuutissa kova kerros, jota vesi ei enää läpäise. Tuhka on siis kasteltava siirtovaiheessa jatkuvalla menetelmällä, eikä siirron jälkeisellä kastelulla.

Testien perusteella tuhkan kasteluun paras ratkaisu on kastella tuhkaa jatkuvana suihkuna tuhkan hydratointitilaan purun aikana. Suuttimien mallista riippuva suihkun tyyppi ja suuttimen asemointi vaikuttavat suuresti veden imeytymiseen tuhkan sekaan.

Paras ratkaisu on järjestelmä, jossa tuhkakasaa ja tippuvaa tuhkaa kastellaan sumuttamalla yläviistosta. Suuttimien asemointi kannattaa tehdä kahdella erillisellä putkistolla, jolloin kasan laajentuessa voidaan vettä ohjata laajemmalle alueelle. Kostutus voidaan näin toteuttaa yksinkertaisesti virtauksen mukaan säätyvällä säätöventtiilillä, joka syöttää vettä näihin kahteen suutinkiertoon, joita käytetään tarpeen mukaan. Kostutusputkistojen periaate on havainnollistettuna kuviossa 9. Puhtaana pysymisen kannalta putkistot kannattaa sijoittaa mahdollisimman ylös, mieluiten kuljettimen purkukohdan yläpuolelle niiltä osin kuin se on mahdollista.



Kuvio 9. Kostutuksen periaate.

Suuttimien valinnassa on tärkeä pyrkiä mahdollisimman pieneen pisarakokoon vesisuihkussa, tällöin tuhka kostuu tasaisimmin. Yleisesti pienin pisarakoko saadaan vesimäärältään mahdollisimman pienillä suuttimilla ja suurella paineella. Suuttimien suihkujen on myös oltava levittäviä (yli 100°). Prototyyppitesteissä käytetyt Spraying Systems Companyn Fulljet ½ HH-35W suuttimet ovat esimerkki sopivan tyyppisestä suuttimesta. Tuhkan pölyämisen hallintaan voidaan lisäksi käyttää pieniä sumutus-suuttimia, mutta prosessin kannalta näillä ei ole merkitystä.

### **Ruuvikostutus**

Tuhkaa on aikaisemmissa märkäpurkujärjestelmissä kasteltu pölyämisen estämiseksi lisäämällä siirtoruuvissa tuhkan sekaan vettä. Ruuvikastelussa tuhka saadaan kostutettua, mutta ajan myötä ruuviin ja kuljettimen seinämiin kerääntyy kovettunutta

tuhkaa, mikä aiheuttaa ongelmia ja vaatii säännöllistä puhdistusta. Kuvio 10 on kostutusruuvi muutama vuorokausi puhdistuksen jälkeen. Jos vettä lisättäisiin useassa kohdassa ruuvia, tällä tavalla voitaisiin päästä prosessin kannalta hyvään lopputulokseen, mutta järjestelmän kunnossapidon tarve ei tue tätä tapaa. Ruuvikastelua keiltiin myös kostutuskokeisiin tehdyllä tuhansiirtoruuvilla ja tulokset tukivat aiempaa kokemusta ruuvikastelun ongelmista.



Kuvio 10. Märkä tuhka kerääntyy voimakkaasti rakenteisiin.

## 7.4 Hydratointitila

### 7.4.1 Tilan koko

Nykyisen lentotuhkasiilon nettotilavuus on  $300 \text{ m}^3$ , tuhakuormien tilastoja tutkittaessa suurin tuhkamäärä vuorokaudessa oli  $394 \text{ m}^3$ . Koko maksimivuorokauden lentotuhka määrä ei siis mahdu kerralla siiloon. Hydratointitila voitaisiin mitoittaa tämän maksimivuorokauden mukaan. Toisaalta hydratointiprosessin tapahtuessa kokonaisuudessaan vuorokauden aikana, pystytään käsittelemään suurempi tuhkamäärä kuin lentotuhkasiiloon kerralla mahtuisi. Tuhkan käsittelyn maksimikapasiteetiksi

vuorokaudessa muodostuu tuhkamäärä, joka mahtuu siiloon ( $300\text{m}^3$ ) ja lisäksi tuhkan hydratointilaan siirtämisen (6h) aikana muodostuva tuhka.

Kuten edellä on todettu, tuhkan hydratointi yhdessä  $400\text{ m}^3$  tuhkaa vastaanottavassa tilassa olisi mahdollista laitteiston kannalta. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin pois purettavan tuhkan kuljetus. Tilan tyhjentäminen riittävän nopeasti olisi vielä mahdollista, mutta koko tuhkamäärän pois kuljettamiseen tarvittava kalusto muodostaa ongelman. Hydratointitilan tyhjentämiseen tarvittaisiin esimerkiksi suurimpina vuorokausina 12 autoa, kantavuudella 28 tonnia. Tyhjennys olisi hoidettava kahdessa tunnissa, näin kuuden tunnin täytön jälkeen aikaa jäisi vielä 16 tuntia hydratoitumisen tapahtumiseen. Tyhjentäminen pystyttäisiin tietysti hoitamaan pienemmällä automäärällä, jos tuhka siirretään lähellä sijaitsevaan välivarastoon, mutta tämän vaihtoehdon mielekkyys on kyseenalainen.

Edellä mainittujen syiden vuoksi on rakennettava kaksi tilaa, jolloin valmista tuhkaa voitaisiin purkaa esimerkiksi 12 tuntia päivässä ja välivarastoinnin tarve vähenisi huomattavasti. Valmiin tuhkan tyhjennys ei myöskään sitoisi pyöräkuormaajaa pitkiksi ajoiksi kerralla, mikäli päädytään pyöräkoneella tapahtuvaan purkuun. Lisäksi aikaa hydratoitumiseen jäisi enemmän, kuten on todettu, prosessin vaatima aika suuressa mittakaavassa on vaikeasti ennustettavissa.

Hydratoitumisreaktio ei kuitenkaan pysähdy kun tuhka puretaan ja siirretään muualle, joten tuhka olisi mahdollistava purkaa kostutuksen ja veden imeytymisen jälkeen. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua se, kuinka märkää tuhka mahdollisesti on, ennen kuin hydratointireaktio on sitouttanut ja haihduttanut liian veden. Ainakin osa tuhkasta voi olla märempää kuin tavoiteltava käsittelykosteus. Tuhkaa on kerralla hydratoitu testeissä noin 10 tonnia, tässä tapauksessa 16 tuntia riitti tuhkan hydratointiin. Suurempien määrien osalta hydratointiaika on kuitenkin arvioiden varassa. Itse reaktion pitäisi viedä sama aika määrästä riippumatta, kosteuden tasaantuminen suurella määrällä voidaan kuitenkin katsoa hitaammaksi. Lisäksi reaktion vaatima ilman hiilidioksidi on suhteellisesti heikommin saatavissa suurilla määrillä. Edellä käsiteltyjen asioiden takia on varauduttava suuremman tuhkamäärän vaatimaan pidempään hydratointiaikaan.

Jos tarvetta tuhkan purkamiselle päivittäin ei nähdä tarpeelliseksi, on mahdollista toteuttaa hydratointi yhdessä suuremmassa tilassa. Yhteen tilaan suuremman tuhkamäärän kasaaminen ei kuitenkaan enää välttämättä onnistu yksinkertaisesti yhdeltä kuljettimelta, jolloin yksi tila ei olisi laitteistoltaan juurikaan kahta hydratointitilaa yksinkertaisempi ratkaisu. Yhden hydratointitilan sovelluksella päästäisiin yhdellä kustutusjärjestelmällä, mutta muuten jouduttaisiin rakentamaan samanlainen järjestelmä kuin kahden hydratointitilan ratkaisussa.

Purettaessa tuhka yhdellä kuljettimella tapahtuu kasautuminen yksinkertaistetusti ympyräkartion muotoon. Laskennallisesti tuhkan kasautuessa 6 metriä korkeaan ja 16 metriä levään kasaan, olisi kasan tilavuus yli 400 kuutiometriä. Tällä oletuksella hydratointitilan kooksi tulee  $272 \text{ m}^2$ , jos tila on 16 metriä leveä ja 17 metriä pitkä. Tuhkan ei kuitenkaan tarvitse kasautua vapaasti ja siksi tilan ei tarvitse olla näin suuri, mutta kokoluokka on tämänsuuntainen. Tilan on kuitenkin oltava tarpeeksi korkea sumukostutuksen onnistumiseksi.

Nykyinen  $300 \text{ m}^3$  lentotuhkasiilo mahdollistaisi 145 tonnin, eli  $168 \text{ m}^3$ :n hydratoinnin yhdellä hydratointitilalla ja 24 tunnin hydratoinnilla.  $300 \text{ m}^3$  jaettuna kahdelle vuorokaudelle olisi  $150 \text{ m}^3$ , mutta määrään voidaan lisätä siirron aikana muodostuva tuhka. Nykyisillä voimalaitoksen tehoilla ja sen tuottamilla tuhkamäärillä tämäkin voisi olla mahdollista.

Haluttava mitoituskoko lopulta ratkaisee yhden ja kahden hydratointijärjestelmän väliltä.

#### 7.4.2 Rakennustekniset vaatimukset

##### **Lämmitys**

Hydratointiprosessissa muodostuu lämpöä, joten varsinaista lämmitystä tila ei tarvitse, jos oletetaan, että rakenteet varaavat lämpöä siinä määrin, ettei talviaikana aiheudu jäätymisongelmia. Kriittisten laitteiden jäätymisen esto on kuitenkin ratkaistavissa muutenkin kuin koko tilaa lämmittämällä ja näin lämmityksen rakentamiselle ei ole välttämättä perusteita. Tila on kuitenkin eristettävä, jotta rakenteisiin varautunut lämpö pitää tilan lämpöasteiden puolella myös talvella. Nämä johtopäätökset lämmi-

tyksen tarpeesta kuitenkin perustavat olettamukseen, että prosessit ovat jatkuvasti toiminnassa. Ellei prosessi ole käynnissä, ei siinä muodostuvaa lämpöäkään ole.

### **Ilmanvaihto**

Tilasta on tehtävä pölyämisen takia tiivis, ettei ympäristölle aiheudu haittoja. Hydratointireaktiossa kuitenkin muodostuu vesihöyryä, jonka takia tilaan on tehtävä ylipaineen estävä ilmanvaihto. Tuhkan pölyäminen ympäristöön voidaan estää laittamalla tähän ”hönkäputkeen” sumukostutus, jonka tuoma vesimäärä ei sekoita prosessia, mutta sitoo tehokkaasti pölyä. Pölynsidonta on oletettavasti tehokkainta pienen pisorakoon muodostavilla paineilmahajotteisilla suuttimilla.

### **Rakenne**

Tilan runkorakenteesta pitää tehdä tarpeeksi vahva kestävä kuljetin- ja kostutuslaitteiston paino, sekä nostinrakenteet ja huoltotasot. Hydratointitilan seinistä on tehtävä ainakin alaosaltaan tarpeeksi vahvat kestävä kasaantuvan tuhkan aiheuttama paine. Näin tilasta saadaan tehokkaan kokoinen verrattuna vapaasti kasautuvaan tuhkaan. Tuhka on myös pystyttävä purkamaan tilasta pyöräkuormaajalla, vaikka normaalitilanteessa purku tapahtuisikin kuljettimelle, tämän takia seinien on oltava alaosaltaan tarpeeksi vahvat kestävä pyöräkoneen kauhalla tapahtuva työntäminen seinää kuormauksessa apuna käyttäessä. Hydratointitilan seinissä ei tästä syystä saa olla hydratointitilan puoleisia ulokkeita.

### **Viemäröinti**

Hydratointitestien perusteella havaittiin, että osa kostutusvedestä ei päädy tuhkaan sekaan. Tämän ja hydratointitilan puhdistuksen takia tilan lattiassa on oltavan kaadot. Kaivojen, joihin vesi ohjataan, on pystyttävä erottamaan kiintoaine vedestä. Jos tuhkaa pääsee suuria määriä viemäriputkistoihin, se kasautuu ja aiheuttaa putkiston tukkeutumista. Jos tuhkan erottamiseen vedestä ei löydy ratkaisua, on lattian kaato suunnattava oviaukosta ulos ja hyväksyttävä pihan jonkin asteinen sotkeutuminen

ainakin tilaa puhdistettaessa. Joka tapauksessa ylimääräistä vettä tilan lattialle ei saisi kerääntyä. Liika vesi aiheuttaa tilan lattialle liejua, joka kuivuessaan kovettuu.

## 7.5 Valmiin tuhkan purkaminen hydratointitilasta

### **Konepurku**

Hydratoitu tuhka on pystyttävä purkamaan helposti hydratointitilasta. Yksinkertaisin vaihtoehto olisi purkaa tuhka pyöräkuormaajalla. Pyöräkuormaajavaihtoehto tulee ottaa huomioon tilan suunnittelussa mahdollistamaan helppo ja nopea tyhjennys. Tämän tavan huonona puolena on sen työvoimaa sitova vaikutus. Hyvänä puolena taas edulliset investointikustannukset, voimalaitoksella on muutenkin pyöräkuormaaja käytössä ja sen käyttöaste mahdollistaneekin myös tuhkan purkamisen hydratointitilasta.

Hydratoidun tuhkan konepurkua testattiin käytännössä lastaamalla prototyyppitesteissä hydratoitu tuhka pyöräkuormaajalla kuorma-auton lavalle. Testissä käytetty tuhka oli hydratoitu jo viikkoa aiemmin ja oli näin niin sanotusti täysin kuivunutta, eikä siis sisältänyt juurikaan irtovettä. Autokuorman (n. 18 tonnia) kuormaaminen tapahtui noin viidessä minuutissa, eli nykyistä purkuruuvia (20 min) nopeammin. Lastattaessa tuhka hieman pölysi, mutta niin vähän, ettei siitä ole haittaa lastauksessa. Verrattaessa nykyisen läjitetyn tuhkan lastaamiseen tuhkan pölyäminen oli olematonta. Tuhkan kuormasi tuhkan kuljetusta säännöllisesti tekevä henkilö ja hän luonnehti tuhkaa erinomaiseksi lastata. Käsittelemätöntä läjitettyä tuhkaa kuormatessa on jopa otettava tuulen suunta huomioon, näkyvyyden mahdollistamiseksi. Prototyyppitesteissä hydratoidussa tuhkassa oli osassa eristä hieman liikaa vettä, jolloin tuhka näytti olevan osittain kovettunut paakuiksi, tämä paakut olivat kuitenkin niin pehmeitä, että murtuivat pieniksi käsittelyn aikana.

Konepurkaminen on siis mahdollista ja lisäksi nopeaa, huonona puolena on sen vaatima työ verrattuna kuljettimella purkamiseen. Tosin kuormaamisen hoitaisi tuhka-auton kuljettaja, joka joutuu kuormaamisen ajan kuitenkin paikalla odottamaan.



## Purkaminen kiinteillä laitteilla

Suunnittelussa ja kustannuslaskennassa kannattaa kuitenkin ottaa selvitykseen myös mahdollisuus purkaa tuhka kiinteällä laitteistolla. Purkaminen voidaan toteuttaa samantapaisilla ruuveilla kuin kiinteän polttoaineen varastosta purkamisessa käytetään. Hydratoitunut tuhkan purettaisiin liikkuvilla purkuruuveilla hihnakuljettimelle, joka siirtäisi tuhkan purkuaukon alle ajetun kuorma-auton lavalle.

Hydratoitu tuhka ei enää keräänny ruuviin, kuten märkä tuhka. Tuhkan hydratointitilaan purkamisen ja kastelun aikana kuljettimet olisi kuitenkin ajettava tilan reunoille, jotta ne pysyisivät puhtaana. Jos tuhkapöly ja vesisumu kuitenkin aiheuttaisivat ruuvien voimakasta likaantumista, on mahdollista rakentaa ruuveille seinien viereen seinästä saranoidut katteet, jotka lasketaan alas, kun ruuvit on ajettu seinän viereen.

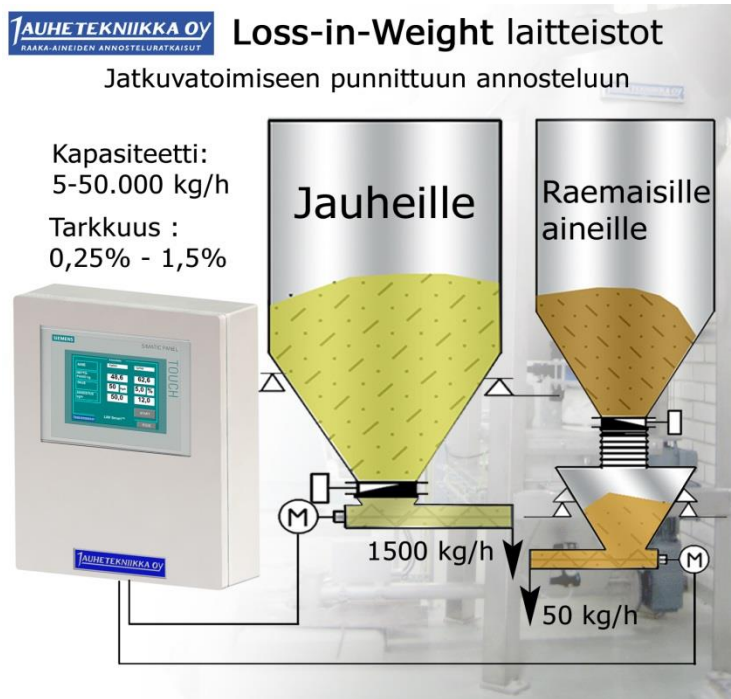
Jos rakennusteknisesti on mahdollista, tuhkan purkaminen kannattaa tehdä yhdellä ruuvilla, joka luonnollisesti tuhkan kastelun aikana olisi jo hydratoidun tuhkan tai tyhjän tilan puolella, liitteen 3 mukaisesti.

Ruuvi myös murskaisi mahdolliset kovettuneet osat tuhkakasasta pienemmäksi.

## 7.6 Lisäaineiden sekoittaminen tuhkan sekaan

Tuhkan ominaisuuksia voidaan tehostaa sekoittamalla tuhkan sekaan lisäaineita.

Suunnittelussa järjestelmässä tuhka siirretään kuivana ruuvikuljetinta käyttäen, joka antaa hyvän mahdollisuuden lisätä tuhkaan lisäaineita. Lisäaineet lisätään jauheena ruuville, tällöin ruuvikuljetin sekoittaa lisäaineen tuhkan sekaan ja lopputuloksena on tasalaatuinen tuote, ilman erillistä sekoittamista. Teollisuuden käyttöön on kehitetty erilaisia jauheannostelijoita, joissa annosteltavaa tuotetta voidaan käsitellä esimerkiksi suursäkissä 500–1000 kg, suursäkistä aine puretaan annostelijaan. Esimerkiksi kuvion 11 mukaisella Jauhetekniikka Oy:n loss-in-weight annostelijoilla annostelukapasiteetit ulottuvat 5–50000 kg/h, annostelutarkkuuden ollessa 0,25–1,5 %. (Loss-In-Weigh n.d.). Lannoitteiden sekoittamisessa määrä olisi 5-10 kg/tunnissa, eli sopiva tämän kaltaiselle laitteistolle.



Kuvio 11. Loss-in-Weight laitteisto jatkuvatoimiseen annosteluun (Loss-in-Weight Smart N.d.)

Lannoite- ja maanparannuskäyttöä varten hyödyllisiä aineita on mm. boori (B), typpi (N) ja joissain tapauksissa myös fosfori (P).

Booria tarvitaan metsään levitettynä n.2 kg/ha, kun taas tuhkaa levitetään metsään 3500 – 4500 kg/ha. (Halonen, 2016c.) Boorin pieni määrä tuhkamäärään nähden vaatii hyvän sekoittamisen tasalaatuisen lopputuotteen saamiseksi. Pitoisuuden mittaamiseksi on lisäksi oltava testi, millä varmistetaan jokaisen erän booripitoisuus. Lisäaine sekoittuu lisää ruuvien jälkeen, jolloin kuljetin ja kasteluvesi levittää tuhkaa. Viimeinen sekoittuminen tapahtuu luonnollisesti tuhkan hydratointia seuraavien käsittelyiden aikana, tuhka tulee hydratointitilaan yhdestä kohdasta ja kasautuu. Kun kasa puretaan, prosessin eri aikoina hydratointitilaan tulleet tuhkat sekoittuvat keskenään.

Metsänlannoituksessa typpeä tarvitaan määrällisesti paljon enemmän kuin fosforia tai booria. Tuhka kuitenkin emäksisyytensä ja lisääntyvän mikrobitoiminnan ansiosta tuottaa humuksesta itsestään typpeä kasveille käyttökelpoiseen muotoon, tämän takia typpeä ei yleensä lisätä täyttä määrää tai metsään ei ehkä ollenkaan. (Halonen 2016 n.d.).

## 7.7 Lietteen avulla hydratointi

Tuhkan hydratointiin voitaisiin teoriassa veden sijasta käyttää myös hieman orgaanista materiaalia sisältävää biolietettä, jolloin lietteen sisältämät ravinteet (mm. typpi) saataisiin hyödynnettyä ja samalla tuhkan lannoiteominaisuuksia parannettua.

Biolietteen kuiva-ainepitoisuus ennen lietteenkäsittelyä on noin 0,5 – 1,5 %. Ensimmäisen käsittelyvaiheen, lietteen tiivistyksen jälkeen kuiva-ainepitoisuus on noin 4-5 prosenttia. (Forssell-Tattari 2009, 11,19). Sumuttamalla tuhkaa kostuttaessa joudutaan käyttämään mahdollisimman pienen pisarakoon saavuttamiseksi pieniä suuttimia, jolloin lietettä käytettäessä olisi suuttimien tukkeutuminen ajan myötä todennäköistä.

Isännäisen, Huotarin ja Mursusen (14, 1997) tekemien testien mukaan biolietteen käyttäminen itsekovetuksessa tuhkan kostuttamiseen veden sijaan heikensi merkittävästi tuhkan kovettumista (Isännäinen, Huotari & Mursunen 1997, 14). Koska lentotuhkan itsekovetus perustuu samaan reaktioon kuin hydratointi, on oletettavaa että myös hydratoinnin lopputulos koostumuksen osalta kärsisi biolietettä käytettäessä.

Biolietteen sisältämät ravinteet olisi kuitenkin mahdollista hyödyntää lisäämällä tuhkan sekaan lietettä erillisellä laitteistolla, esimerkiksi lautaslevittimellä. Kostutusveden määrässä lietteen lisäys olisi tietysti huomioitava.

## 7.8 Prosessin ohjaaminen

Hydratointi on prosessina hyvin yksinkertainen, jolloin prosessin ohjaamisen ja valvontaa riittää hyvin kevyt järjestelmä. Prosessin toiminnan kannalta on pystyttävä mittaamaan ja valvomaan ainakin seuraavia asioita:

1. tuhkan massavirta
2. prosessin aikana siirretty tuhkamäärä yhteensä
3. kostutusveden massavirta
4. prosessin aikana tuhkan sekaan lisätty vesimäärä yhteensä
5. lisäaineiden massavirta ja prosenttiosuus tuhkaseoksesta

6. käyntitiedot kuljettimilta
7. tuhkan lämpötila.

## 7.9 Lentotuhkasiilo

Nykyinen lentotuhkasiilo on tilavuudeltaan 300 m<sup>3</sup>. Siilon tilavuus on pienempi kuin huippuvuorokausina muodostuneen tuhkan. Tilavuus on toistaiseksi riittänyt, kun siiloa on jatkuvasti tyhjennetty. Hydratointi on mitoitettu tämä lentotuhkasiilo lähtöarvona, mikä asettaa enimmäisajan, joka hydratoinnille on käytettävissä. Tuhkan siirto hydratointitilaan ja kastelu vie aikaa, samoin käsitellyn tuhkan purkaminen tilasta. Nämä ajat ovat suunnittelussa laskettuja ja ennustettavissa. Epävarmuustekijä muodostuu hydratointireaktion vaatimasta ajasta. Vaikka hydratointikokeita on tehty, reaktion vaatima aika voi kasvaa hydratoitavan tuhkamäärän kasvaessa. Lopullista sovellusta vastaavan mittakaavan kokeiden tekeminen ei ennen laitteiston valmistumista ole mahdollista.

Merkittävin ongelma tuhkan purussa aiheutuu ajasta, jossa tuhka pitäisi pystyä kuljettamaan muualle. Ongelma ei siis ole tuhkan purkaminen vaan tarvittavan kuljetuskaluston saaminen käyttöön kerralla ja tarkasti oikeaan aikaan. Tämä ongelma vastaan vain huippuvuorokausina ja näitä vuorokausia on vain osan aikaa vuodesta. Tuhkan osittainen purkaminen ilman käsittelyä voitaisiin luultavasti hyväksyä. Hydratointireaktio toisaalta jatkuu, vaikka tuhka siirrettäisiin etuajassa muualle. Mutta jos tuhka on vielä osin märkää purettaessa, siitä aiheutuu ongelmia, joista projektissa yritettiin päästä eroon.

Lentotuhkasiiloa uusittaessa tai uutta laitosta rakennettaessa on mitoituksessa otettava huomioon hydratoinnin vaatima aika ja on päätettävä, halutaanko rakentaa suurempi siilo vai kaksi hydratointitilaa.

## 7.10 Reaktion vapauttaman lämmön hyödyntäminen

Tuhkan lämpeneminen hydratoitumisreaktiossa oli tiedossa jo aiempien tutkimusten perusteella. Hydratointikokeiden mittakaavaa nostettaessa lämmön suhteellinen johtuminen ympäristöön kuitenkin vähentyi, ja jo viiden kilogramman näytteen lämpötila oli korkeimmillaan 65 °C astetta. Tässä tapauksessa alkulämpötiloissa tuhka oli 20 °C ja vesi 7 °C. Koska lämmön nousu oli näinkin merkittävää, oli järkevää selvittää vapautuva energia tarkemmin ja pohtia, onko reaktioissa vapautuva lämpö hyödynnettävissä.

Hydratointireaktion seurauksena lämmenneen tuhkan hyödynnettävissä oleva lämpöenergiamäärä saatiin laskettua, kun tiedettiin tuhkan ja veden omaislämpökapasiteetti. Lisäksi asetettiin oletus, kuinka paljon tuhka-vesiseosta viilennettäisiin lämmön talteenotossa. Lentotuhkan ominaislämpökapasiteetti on 840 J/kgK (Hildén 2010. 5). Veden omaislämpökapasiteetti taas 4181 J/kgK (Valtanen 2012. 341). Tuhka-vesiseoksen ominaislämpökapasiteetti riippuu seoksen seossuhteesta. Kaavan 4 mukaisesti laskettuna 25 prosenttia vettä sisältävällä seoksella tulokseksi saadaan 1660 J/kgK ominaislämpökapasiteetti.

$$c = \frac{H_2O \cdot m \cdot c_1 + A \cdot m \cdot c_2}{H_2O \cdot m + A \cdot m} \quad (4)$$

jossa

$c$  = seoksen ominaislämpökapasiteetti J/kgK

$c_1$  = veden ominaislämpökapasiteetti J/kgK

$c_2$  = tuhkan ominaislämpökapasiteetti J/kgK

$H_2O$  = vesi

$A$  = tuhka

$m$  = massa kg

Näillä lähtöarvoilla voidaan laskea, että jos hydratoidaan 200 tonnia tuhkaa ja oletetaan keskimääräiseksi kosteusprosentiksi 25, on 45 Kelvinin lämpötilaerolla seoksessa 5,5 MWh lämpöenergiaa hyödynnettäväksi.

(5)

$$J = kg * \frac{J}{kgK} * K$$

jossa

*J = reaktiossa vapautuva lämpöenergia*

*kg = tuhka/vesi seoksen massa*

*J/kgK = seoksen ominaislämpökapasiteetti*

*K = lämpötila*

Tuhkan pienen ominaislämpökapasiteetin takia vapautuva lämpöenergia on kuitenkin pieni suhteessa suureen ainemäärään, mikä prosessissa käsitellään. Liitteessä 4 laskelma hydratoinnin vapauttamasta lämpöenergiasta.

## 8 Kustannukset

Hydratoinnin toteuttamisen kustannuksia ei ole opinnäytetyössä selvitetty. Kustannusten muodostumisen lähteitä voidaan kuitenkin pohtia.

Kustannuksista merkittävän osan muodostaa hydratointirakennus ja kuljettimet. Kuljetinkustannukset lopulta määrittelee valittava kuljetinratkaisu ja hydratointitilan sijainti. Joka tapauksessa tarvittavat ruuvi- ja hihnakuljettimet ovat teollisuuden perussovellutuksia ja raportissa esitettyjen suoritusarvojen avulla kuljettimien tarkempi tyyppi ja sitä kautta kustannukset ovat laskettavissa helposti.

Kostutusjärjestelmän komponentit ovat myös teollisuuden perustarvikkeita. Ruostumattomat putkistot asennuksineen aiheuttavat kostutusjärjestelmän suurimmat kustannukset, lisäksi kustannuksia syntyy tarvittavista automaattisulku- ja säätöventtiileistä.

Suurin kustannuksiin investoinnin sisällä vaikuttava päätös on hydratoidun tuhkan purkamisen toteuttaminen kiinteällä kuljettimella tai pyöräkuormaajalla.

Jatkuvaan annosteluun pystyvistä lannoitteiden lisäksi soveltuvasta annostelijasta pyydettiin hinta-arvio laitetoimittajalta. Muita tarjouspyyntöjä tai vastaavaa ei työssä tehty.

## 9 Ongelmatilanteet hydratoinnin kannalta

Mahdollisia häiriötilanteita ja ongelmia hydratoinnin kannalta aiheuttaa lannoitekäytön kannalta vääränlainen polttoaine.

Jouduttaessa polttamaan raskasta polttoöljyä muodostuva tuhka on ongelmajätettä, jolle ei ole hyötykäyttöä metsälannoitteena (Emilsson & Bergström 2006, 15). Tällä öljyn poltosta muodostuvalla tuhalla ei saa sotkea hydratointijärjestelmää, koska lannoitetuhkaan sekaan ei saa joutua tätä tuhkaa. Öljyn poltosta muodostuva tuhka on näin purettava siilosta käsittelemättä.

Toinen mahdollinen ja lannoitekäytön kannalta huono tilanne on, jossa turpeen osuus poltettavassa polttoaineseoksessa kasvaa ja samanaikaisesti ei saada lietettä poltettavaksi. Tällöin tuhkan ominaisuudet lannoitteena muuttuvat, sillä turpeenpoltoista muodostuva tuhka sisältää vähemmän ravinteita, vaikkakin myös vähemmän raskasmetalleja, kuin puutuhka. Turvetuhka voidaan siis hydratoida ja käyttää myös lannoitteena ja esimerkiksi tienpohjaksi tai muuhun maarakennuskäyttöön. Metsälannoitteena turvetuhkalla on kuitenkin huonommat ominaisuudet, kuin puutuhkalla ja lietettä enemmän sisältävällä sekatuhkalla.

## 10 Johtopäätökset ja pohdinta

Projektin aikana tehtyjen testien ja pohdintojen perusteella tuhkan hydratointi teollisessa mittakaavassa on mahdollista suorittaa raportissa esitetyn laitteiston avulla. Tälle johtopäätökselle painoarvoa antaa prototyyppitestissä hydratoitu 10 tonnin tuhkaerä, jonka hydratointi toteutettiin samalla tavalla kuin teollisessa sovellutuksessa tulisi olemaan. Suunnitelmassa esitetyn kaltaisella laitteistolla myös päästäisiin eroon nykyisen tuhkanpurkujärjestelmän pölyongelmista ja puhdistustarpeista. Vaikka tuhkan hydratoituminen ei olisi vielä edes täydellistä, tuhka olisi silti helpommin käsiteltävissä sisältämänsä tasaisen kosteuden takia. Tasaisesti imeytetty kosteus ei kuitenkaan aiheuttaisi samoja ongelmia kuin nykyinen purkaessa tapahtuva kastelu, jossa vettä jää irtonaisena tuhkan sekaan ja lavalle. Pelkästään näiden syiden vuoksi uutta laitosta rakennettaessa hydratointi olisi harkittava vaihtoehto lentotuhkan varastointiin ja purkamiseen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onnistuuko tuhkan hydratointi teollisessa mittakaavassa, kuinka se on toteutettavissa ja onko toteutus kustannustehokasta.

Opinnäytetyön uusi asia oli selvittää, kuinka tuhka pystytään yksinkertaisesti ja mahdollisimman huoltovapaasti kostuttamaan. Tämän kysymyksen selvittämiseen työssä käytettiin eniten aikaa. Muut hydratoinnin toteuttamiseen tarvittavat laitteet ovat teollisuudessa ja voimalaitoksilla käytettäviä perussovelluksia, eikä niihin ollut järkevää käyttää resursseja hydratoinnin onnistumisen kannalta ratkaisevimman asian kustannuksella.

Valmista suunnitelmaa ja piirustuksia hydratointiprosessin toteuttamiselle ei työn pohjalta tehty, mutta opinnäytetyö tuo esille ratkaisevat tekijät, joiden pohjalta varsinainen suunnittelutyö voidaan aloittaa, jos hydratointi päädytään toteuttamaan. Ennen päätöstä toteuttamisen tarkemmasta selvittämisestä olisi tehtävä karkea kustannusarvio, joka antaisi ensimmäisen tuntuman investoinnin järkevyydestä.

Hydratointiprosessin rakentamisen mielekkyys jo olemassa olevaan laitokseen on lopulta päätettävissä vasta tapauskohtaisen kustannusarvioinnin jälkeen. Hydratoidun ja lisääaineistetun tuhkan osalta on myös selvitettävä, onko tuotteelle luotavis-



sa kannattavia markkinoita. Koska kyseessä on uusi tuote, tämä ei ole vielä selvillä. Jos tälle tuhkatuotteelle on markkinoita, jotka mahdollistaisivat lentotuhkan loppukäytölle nykyistä pienemmän kulut tai mahdollisia tuloja, on investoinnin mielekkyys ilmeistä.

Tutkimus toteutettiin helmi- ja huhtikuun välisenä aikana. Polttoaineiden käyttösuhteet ovat hyvin erilaisia vuodenaikojen ja laitoksen tehon mukaan. Polttoaineseoksen muutoksesta seuraa vaihtelua myös lentotuhkan koostumukseen, tämän vaikutuksesta hydratointiin ei tutkimuksessa päästy kartoittamaan. Tästä seuraa epävarmuus hydratointitestien tuloksen toistettavuudesta eri vuodenaikoina. Suunniteltaessa hydratoinnin toteutusta muilla voimalaitoksilla on myös huomioitava kyseisen laitoksen käyttämä polttoaineseos verrattuna työssä käsiteltyyn Kaipolan voimalaitokseen.

Lentotuhkan tehokkaamman hyödyntämisen takia olisi kannattavaa tulevaisuudessa kartoittaa tuhkan hydratoinnin mahdollistamia uusia käyttökohteita metsä- ja pelto- lannoituksen ja muiden totuttujen kohteiden lisäksi.

Opinnäytetyössä käsitellyn tuhkan lisääineistämisen vaikutusta hydratointireaktioon on myös tutkittava, koska tässä työssä sitä ei tehty. Sen lisäksi että tuhkan lannoite- käyttöä tehostavassa lisääineistamisessa on myös runsaasti tutkittavaa tehokkaimman lopputuloksen saavuttamiseksi, on selvitettävä myös lainsäädännön asettamat rajat lannoitukselle. Lisääineistämisen tuomia mahdollisuuksia muissa lentotuhkan käyttökohteissa olisi myös kannattavaa tutkia osana lentotuhkan uusien käyttökohteiden kartoittamista.

Lakien ja säännösten asettamia raja-arvoja raskasmetallien ja muiden alkuaineiden pitoisuuksille ja liukenemiselle lentotuhkan hyötykäyttämisen kannalta ja hydratoinnin vaikutusta näihin raja-arvoihin on myös tutkittava osana kartoitusta hydratoinnin toteuttamisen kannattavuudesta.

Opinnäytetyön teoriapohjana käytetyt julkaisut sivusivat aihetta lentotuhkan käsitte- lyn ja lentotuhkan lannoitekäytön näkökulmasta. Näitä aiheita on tutkittu viime vuosi- suhteellisen laajasti ja näin lähdemateriaalia oli melko runsaasti käytettävissä. Aiheen luonteen vuoksi suurin osa käytettävissä olleesta lähdemateriaalista oli Suo- messa tehtyjen tutkimusten pohjalta tuotettua. Itse tuhkan hydratoinnista ei julkais-

tua materiaalia tietenkään vielä ole, mutta samankaltaisia reaktioita käsitteleviä julkaisuja kuitenkin löytyi.

Mielestäni opinnäytetyö täyttää sille asetetut tutkimustavoitteet.

## Lähteet

- Eskilstuna plant. N.d. Power-technology.com. Energia-alan julkaisu. Viitattu 14.4.2016. <http://www.power-technology.com/projects/eskilstuna/eskilstuna4.html>
- Forssell-Tattari, I. 2009. Selluteollisuuden jätevedenpuhdistamon bioliete ja sen tuhkapitoisuus. Ympäristötekniikan kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Halonen, M. 2004. Eriasteisesti kostutetun tuhkan liukenevuus analyysit. Sähköpostiviesti 10.5.2016. Vastaanottaja J.Arvoja. Tulokset hydratoidun tuhkan liukenevuus analyysista.
- Halonen, M. 2009. Lisätietoa hydratoinnin vaikutuksesta ja tuhkan lannoitekäytöstä. Sähköpostiviesti 29.3.2016. Vastaanottaja J.Arvoja. Hydratointia tutkineen tohtori Halosen vastaus kysymyksiin hydratoinnista.
- Halonen, M. 2016. Hydratointi kemiallisesta näkökulmasta. Sähköpostiviesti 18.4.2016. Vastaanottaja J.Arvoja. Tohtori Halosen antamia lisätietoja hydratoinnista.
- Halonen, M. N.d. Tiivistelmä hydratoidusta lentotuhkasta. Sähköpostiviesti 1.2.2016. Vastaanottaja J.Arvoja. Haloselta saatu tiedonanto hydratoidusta lentotuhkasta.
- Heinjoki, A. & Halonen, M. Tuhka/lietekoeket. 2014. Raportti tuhka- ja lietenäytteiden analysoinnista. Sähköpostiviesti 2.2.2016. Vastaanottaja J.Arvoja. Pyydetty raportti tuhka- ja lietenäytteiden analysoinneista.
- Hildén, H. 2010. Opinnäytetyö. Kattilan hyötysuhteen määrittäminen. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. 2010. Viitattu 1.4.2016. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201005068194>
- Holtzclaw, H., Robinsson, W. & Odom, J. 1991. General Chemistry (Nineth Edition). Toronto. 47, 389-399, 830.
- Isännäinen, S., Huotari, H. & Mursunen, H. 1997. Lentotuhkan itsekovetus. Metsätehon raportti 30. Tutkimusselostus VTT Energiassa tehdyistä laboratoriakokeista. Helsinki: Metsäteho Oy. Viitattu: 27.2.2016. [http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon\\_raportti\\_030.pdf](http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_030.pdf)
- Isännäinen, S., Rinne, S., Järvelä, E. & Lindh, T. 2006. Tuhkan käyttö metsälannoitevalmisteena. RecAsh –projekti. Internet tiedote. Viitattu 9.2.2016. <http://www.skogsstyrelsen.se/Global/myndigheten/Projekt/RecAsh/Handb%C3%B6cker%20Handbooks/RecAsh%20handbok%20%28finska%29.pdf>
- Jokilaakson tehtaiden esittelymateriaali 2016. PowerPoint-esitys. UPM-Kymmene Oyj. Esitys Jokilaakson tehtaiden järjestelmässä.
- Jutila, T. & Hakola, J. 2012. Tuhkan rakeistaminen Pohjois-Pohjanmaalla. Raportti. Ramboll. Viitattu 18.4.2016. [http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Tuhkan-rakeistaminen-P-Pohjanmaalla-15082012\\_Valmis.pdf](http://www.metla.fi/hanke/7464/pdf/Tuhkan-rakeistaminen-P-Pohjanmaalla-15082012_Valmis.pdf)
- Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Verkkojulkaisu. Ramboll. Viitattu 28.4.2016. [http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf)

- Kola- ja ruuvivaakojen esittely. 2014. Kouvo automation. Teollisuuden mittaussovelluksiin erikoistunut yritys. Viitattu 14.4.2016.  
<http://www.kouvo.fi/tuotteet/radiometriset-kuljetinvaaat/kola-jaruuvivaaka>
- Korpilahti, A. 2003. Tuhkan esikäsittely metsäkäyttöä varten. Metsätehon raportti 143. Helsinki: Metsäteho Oy. Viitattu 18.4.2016.  
[http://metsate1.asiakkaat.sigmatic.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon\\_raportti\\_143.pdf](http://metsate1.asiakkaat.sigmatic.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_143.pdf)
- Lindroos, N. Ronkainen, M. & Järvinen, K. 2016. Metsä- ja energiateollisuuden jätejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. Tutkimusraportti. Ympäristöministeriö. Viitattu 18.4.2016.  
[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/64970/YMra\\_8\\_2016.pdf?sequence=1](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/64970/YMra_8_2016.pdf?sequence=1)
- Loss-In-Weigt annostelijoiden esite. N.d. Jauhetekniikka. Jauhe- ja nestemäisten tuotteiden käsittelyyn erikoistunut yritys. Viitattu 3.2.2016.  
[http://www.jauhetekniikka.fi/images/punnitus\\_ja\\_annostelu/jauheannostelijat\\_jatkuvatoimiseen\\_annosteluun/Loss\\_in\\_w.pdf](http://www.jauhetekniikka.fi/images/punnitus_ja_annostelu/jauheannostelijat_jatkuvatoimiseen_annosteluun/Loss_in_w.pdf)
- Loss-in-Weight Smart. N.d. Annostelijat jatkuvatoimiseen punnittuun annosteluun. Jauhetekniikka. Jauhe- ja nestemäisten tuotteiden käsittelyyn erikoistunut yritys. Havainnekuva annostelijasta. Viitattu: 3.5.2016  
<http://www.jauhetekniikka.fi/tuotteet/punnitus-ja-annostuslaitteistot-jauheille/jauheannostelijat-erae-annostukseen-2>
- Magneettisten mittareiden esittely. N.d. Konwell. Virtausmittareiden valmistaja. Viitattu 17.2.2016. <http://www.konwell.fi/kenttalaitteet-ja-instrumentit/virtausmittarit-ja-energiälaskurit/69-magneettiset-mittarit>
- Makkonen, T. (toim.) 2008. Tuhkalannoitus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Viitattu 12.4.2016.  
[http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalannoitus\\_tapio\\_2008\\_pakattu.pdf](http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/pictures/tuhkalannoitus_tapio_2008_pakattu.pdf)
- Moilanen, M. 2009. Metsätuhkan ravinteet takaisin metsään. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 9.2.2016.  
[http://www.motiva.fi/files/3014/Metsatuhkan\\_ravinteet\\_takaisin\\_metsaan.pdf](http://www.motiva.fi/files/3014/Metsatuhkan_ravinteet_takaisin_metsaan.pdf)
- Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WSOY
- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurkisuonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus.
- UPM:n tilinpäätöstiedote. 2015. UPM-Kymmene Oyj. Viitattu 10.2.2016.  
<http://hugin.info/165629/R/1982926/726629.pdf>
- Valtanen, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-Kirjat Oy.
- Väisälä, S., Korpela, H. & Kaituri, M. Nd. Säteilyn käyttö teollisuudessa ja tutkimuksessa. Viitattu 16.2.2016.  
[http://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja3\\_4.pdf/3a0476ed-4bbd-47fb-b27c-9a403a965cda](http://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja3_4.pdf/3a0476ed-4bbd-47fb-b27c-9a403a965cda)

Ympäristötilasto. Vuosikirja 2014. Tilastokeskus. Helsinki: Edita Prima Oy Viitattu 8.2.2016.

[http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/ymp\\_ymp\\_201400\\_2014\\_12020\\_net.pdf](http://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/ymp_ymp_201400_2014_12020_net.pdf)

## Liitteet

Liite 1. Jyväskylän yliopistossa tehtyjen tuhka ja liete -hydratointikokeiden tuloksia. (Heinjoki & Halonen 2014.)

Näyte nro	Tuhka, g	Liete, g	Yht. g	Lisätty kosteus, %	Loppukosteus hydratoitumisen jälkeen, %	Haihdunta kosteusmuutos, %-yksikköä
1	300	0	300	0	0,04	0,04
2	300	20	320	6,25	4,3	-1,95
3	300	30	330	9,09	4,29	-4,8
4	300	40	340	11,76	9,59	-2,17
5	300	60	360	16,67	9,2	-7,47
6	300	80	380	21,05	16,5	-4,55
7	300	100	400	25	20,3	-4,7
8	300	150	450	33,33	27,9	-5,43
9	0	300	300	100 (99)	100 (99)	

## Liite 2. Tuhkan liukenevuusanalyysit.

(Halonen 2004).

**UPM-Kymmene Oyj Kaipolan voimalaitos, Tuhkanäytteiden analysointi****Eriasteisesti kostutetun tuhkan liukenevuus (Markku Halonen)****Jyväskylän yliopisto:**

Tuhkanäytteiden esikäsittelynä tehtiin asetaatti + etikkahappo uutto

Uuttoliuos oli ammoniumasetatin ja etikkahapon suhteen 0,5 M uuttoajan ollessa 1 h

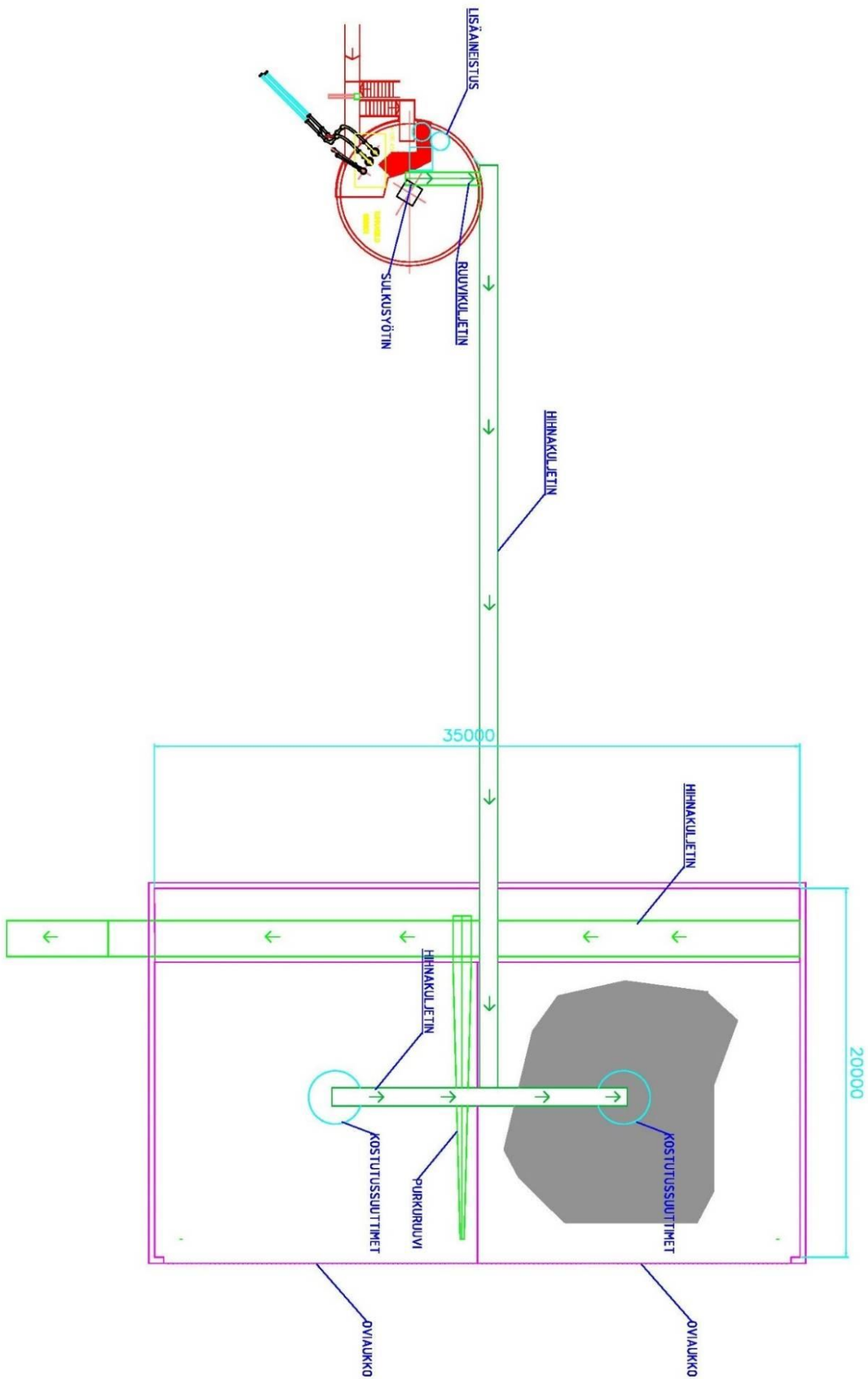
Tuhkanäytteiden analysointi tapahtui ICP-OES -laitteella

Koe liittyy opintoihin: Markku Halonen

**OTE MITTAUSTULOKSISTA**

Näyte/KOE 1	Mitattu kosteus-%	Näyte/KOE 3	Mitattu kosteus-%	Näyte/KOE 4	Mitattu kosteus-%
	<b>0,036</b>		<b>7,62</b>		<b>10,5</b>
	(Kuiva tuhka)				
	Pitoisuus		Pitoisuus		Pitoisuus
Alkuaine	mg/kg	Alkuaine	mg/kg	Alkuaine	mg/kg
Ag	< 5	Ag	< 5	Ag	< 5
Al	24-55	Al	< 5	Al	< 5
As	< 5	As	< 5	As	< 5
B	27-32	B	30.5-31.5	B	28-30
Ba	104-117	Ba	20.6-21.0	Ba	19-21
Be	< 10	Be	< 10	Be	< 10
Bi	< 10	Bi	< 10	Bi	< 10
Ca	84000-92000	Ca	92400-93200	Ca	90500-90900
Cd	1.6-1.8	Cd	1.42-1.44	Cd	1.42-1.45
Co	< 3	Co	< 3	Co	< 3
Cr	2.5-2.7	Cr	7.16-7.19	Cr	6.95-6.96
Cs	102-116	Cs	20.4-20.9	Cs	19.1-20.4
Cu	4.3-8.1	Cu	< 5	Cu	5.3-5.4
Fe	< 5	Fe	< 5	Fe	< 5
Ga	< 10	Ga	< 10	Ga	< 10
Hg	< 5	Hg	< 5	Hg	< 5
In	< 10	In	< 10	In	< 10
K	4500-4700	K	5430-5450	K	5430-5470
Li	< 5	Li	4.5-4.7	Li	4.65-4.75
Mg	5750-5790	Mg	5160-5210	Mg	5010-5070
Mn	335-435	Mn	139-141	Mn	171-182
Mo	5.42-5.46	Mo	< 5	Mo	< 5
Na	813-883	Na	1150-1170	Na	1180-1190
Ni	6.7-7.9	Ni	5.91-5.93	Ni	5.9-6.0
P	653-1140	P	22.4-24.5	P	15.4-22.7
Pb	< 10	Pb	< 10	Pb	< 10
Rb	< 50	Rb	< 50	Rb	< 50
S	6020-7420	S	8530-8680	S	8250-8390
Sb	< 10	Sb	< 10	Sb	< 10
Se	< 5	Se	< 5	Se	< 5
Si	1010-1340	Si	165-173	Si	188-210
Sr	261-290	Sr	297-301	Sr	286-296
Tl	< 10	Tl	< 10	Tl	< 10
U	< 20	U	< 20	U	< 20
V	2.5-2.7	V	< 2	V	< 2
Zn	31-91	Zn	115-117	Zn	149-150

Liite 3. Layout esimerkki hydratoinnin toteutuksesta.





## Liite 4. Laskelma hydratoinnissa muodostuvasta lämpöenergiasta.

lentotuhka J/ kgK	840		
vesi J/kgK	4182	max lämpö	65
		lämpö jäähtymisen jälkeen	20
Kosteusprosentti	25 %	lämpötilaero K	45
Tuhkan määrä kg	200000		
Veden määrä kg	65000	lämpöenergia J	1,98E+10
Yhteispaino kg	265000	lämpöenergia Wh	5497875
Ominaislämpökapasiteetti J/kgK	1659,736	lämpöenergia MWh	5,497875

$$\text{Seoksen ominaislämpökapasiteetti J/kgK} = \frac{\text{vesi kg} * \text{vesi} \frac{J}{kgK} + \text{tuhka kg} * \text{tuhka} \frac{J}{kgK}}{\text{vesi kg} + \text{tuhka kg}}$$

$$\text{reaktiossa muodostuva lämpöenergia J} = \text{seoksen paino kg} * \text{ ominaislämpök.} \frac{J}{kgK} * \text{ lämpötilaero K}$$